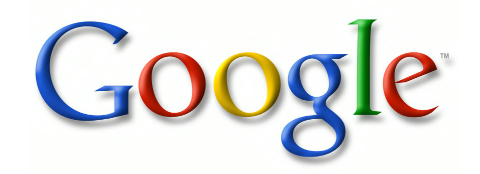
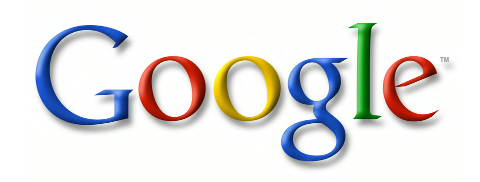
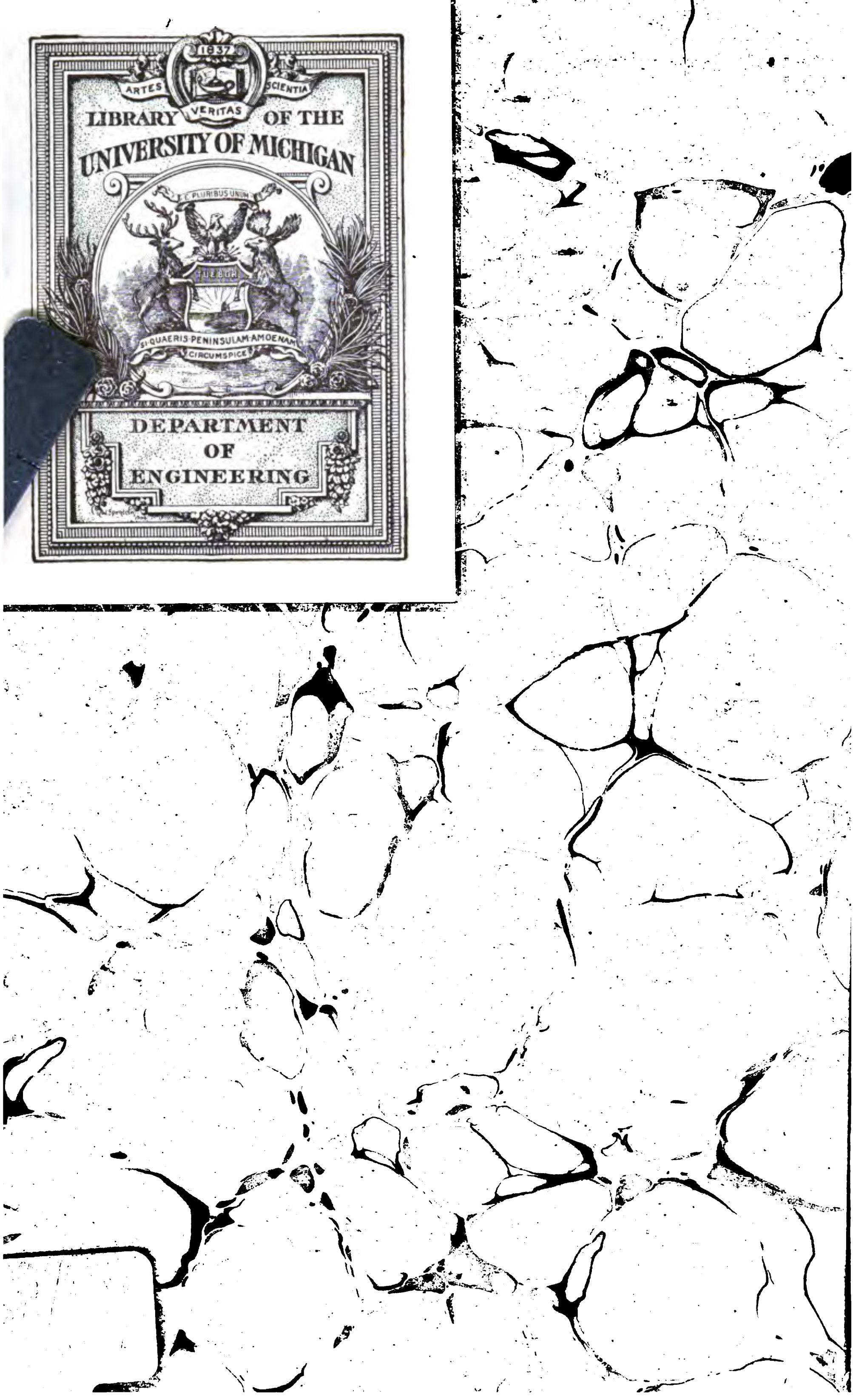





1837
ARTES
VERITAS
SCIENTIA
LIBRARY OF THE
UNIVERSITY OF MICHIGAN
E PLURIBUS UNUM
TUEBOR
SI QUAERIS PENINSULAM AMOENAM
CIRCUMSPICE
DEPARTMENT
OF
ENGINEERING



FORMULES, TABLES

ET

RENSEIGNEMENTS USUELS

AIDE-MÉMOIRE

DES INGÉNIEURS, DES ARCHITECTES, ETC.

PARTIE PRATIQUE

—

TOME PREMIER

AUTRES OUVRAGES

De MM. J. CLAUDEL et L.-A. BARRÉ

J. CLAUDEL et L.-A. BARRÉ. **Introduction à la Science de l'Ingénieur.** *Aide-mémoire des ingénieurs, des architectes, etc.* PARTIE THÉORIQUE. 1 fort vol. in-8 de 1220 pages, avec 725 figures intercalées dans le texte et 3 planches. 7e édition. PRIX : 19 fr.

J. CLAUDEL et L. LAROQUE. **Pratique de l'art de construire.** *Maçonnerie, terrasse et plâtrerie.* 1 beau volume in-8, de 800 pages, avec 167 figures intercalées dans le texte. 5e édition. PRIX : 15 fr.

J. CLAUDEL et SÉGUIN aîné. **Tables des carrés et des cubes des nombres entiers successifs de 1 à 10000.** 1 vol. in-8. PRIX : 3 fr. 50.

J. CLAUDEL et F. LECOY. **Comptes faits.** *Table des produits des nombres entiers de 1 à 1000 par les nombres entiers de 1 à 100.* 1 vol. in-8. PRIX : 4 fr. 50.

J. CLAUDEL, L.-A. BARRÉ et F.-M. JAŸ. 2e édition du **Traité spécial de la coupe des pierres**, de J.-P. DOULIOT. 1 fort vol. in-4, avec figures intercalées dans le texte, et un atlas de 123 planches. PRIX : 30 fr.

J. CLAUDEL et L.-A. BARRÉ. **Ponts biais** (Extrait du *Traité de la coupe des pierres*). 1 vol. in-4, avec figures et planches. PRIX : 7 fr. 50.

Colonel EMY et L.-A. BARRÉ. **Traité de charpente.** 3 vol. in-4, avec atlas. PRIX : 125 fr.

On vend séparément :

L.-A. BARRÉ. **Charpenterie métallique.** 2e édition. In-4, avec atlas. PRIX : 35 fr.

PARIS. — IMP. C. MARPON ET E. FLAMMARION, RUE RACINE, 26.

FORMULES, TABLES

ET

RENSEIGNEMENTS USUELS

AIDE-MÉMOIRE

DES INGÉNIEURS, DES ARCHITECTES, ETC.

PARTIE PRATIQUE

PAR

J. CLAUDEL

Ingénieur civil, ancien élève de l'École centrale des arts et manufactures,
Professeur de mécanique à l'Association philotechnique, Chevalier de la Légion d'honneur.

DIXIÈME ÉDITION ENTIÈREMENT REFONDUE

PAR

L.-A. BARRÉ

Ingénieur civil, ancien élève de l'École centrale des arts et manufactures,
Professeur de mathématiques à l'Association polytechnique, Officier de l'Instruction publique.

TOME PREMIER

CONTENANT 172 FIGURES INTERCALÉES DANS LE TEXTE

PARIS

Vve Ch. DUNOD, ÉDITEUR

LIBRAIRE DES CORPS NATIONAUX DES PONTS ET CHAUSSÉES, DES MINES
ET DES TÉLÉGRAPHES

Quai des Grands-Augustins, 49

1892

AVERTISSEMENT

DE LA DIXIÈME ÉDITION (1892)

La première édition des *Formules-Tables* a paru en 1846. C'était le premier ouvrage du genre, et son succès ne tarda pas à répondre à l'espérance de son auteur.

Aujourd'hui, après une période de quarante-six ans, pendant laquelle cet ouvrage a eu neuf éditions, cet aide-mémoire est encore, malgré les nombreux essais similaires, celui que l'on consulte avec le plus de confiance et de fruit.

Cette vieille réputation, sans précédent pour un ouvrage de cette nature, est due à la concision et à la conscience avec lesquelles il avait été conçu dès le début, et aussi au nombre considérable de matières qu'il embrasse et qui en constitue une véritable encyclopédie des ingénieurs et des constructeurs, qui le consultent journellement.

La neuvième édition étant épuisée, et l'ouvrage ayant besoin d'être tenu au courant des recherches et travaux faits dans ces dernières années, les éditeurs ont décidé d'en faire une refonte complète, afin qu'il soit à la hauteur de sa renommée, bientôt demi-séculaire, et des progrès de la science.

Mais l'auteur, depuis longtemps déjà, n'est plus là pour reviser son œuvre; il est mort le 24 juillet 1880.

Ancien élève de J. Claudel, puis son collaborateur et ayant déjà revu et augmenté, en 1885, la septième édition de l'*Introduction à la science de l'ingénieur*, j'ai été chargé de

la dixième édition des *Formules-Tables*. J'ai accepté cette mission dans l'espoir de continuer une œuvre utile, en m'inspirant, autant que possible, de l'esprit qui avait présidé aux précédentes éditions.

Aussi notre travail n'a pas consisté uniquement à relire les épreuves; nous ne nous sommes pas contenté d'un examen superficiel, et l'on pourra voir que tous les chapitres ont été augmentés ou revisés, aussi complètement que nous l'a permis la place exiguë dont nous disposions.

La *Résistance des matériaux* a été l'objet de notre attention toute spéciale, et nous avons largement fait profiter la nouvelle édition de nos recherches personnelles.

Une section entièrement nouvelle a été ajoutée : l'*Électricité*, dont les applications multiples se diversifient chaque jour. L'ouvrage aurait présenté une véritable lacune s'il avait tardé plus longtemps à passer sous silence cette partie si importante de la physique.

La *Métallurgie* a fait également l'objet d'un chapitre nouveau. Nous avons modifié surtout les chapitres sur les *Distributions d'eau*, sur l'*Éclairage*, sur les *Chaudières*, sur les *Machines à vapeur*, sur les *tramways*, sur le *pavage*, etc. Nous nous sommes étendu sur l'*Emploi du métal dans la construction*. L'Exposition universelle de 1889 nous a fourni l'occasion de faire des additions importantes; enfin, de nombreuses figures nouvelles ont complété ou remplacé les anciennes.

En somme, nous avons essayé de continuer la tradition de Claudel, en nous bornant toutefois au strict nécessaire. On comprendra facilement que nous aurions été conduit à augmenter démesurément les dimensions de cet ouvrage si nous avions voulu traiter à fond des questions aussi étendues et aussi complexes que les *Machines à vapeur* ou les *Chemins de fer*, par exemple. Là, comme en bien d'autres circonstances, nous avons dû, à regret, nous restreindre.

Nous devons dire aussi que bon nombre de personnes ont bien voulu nous prêter leur concours ou nous fournir des ren-

seignements que nous avons utilisés. Nous les avons mentionnées aux paragraphes où nous avons inséré leurs travaux. Nous leur adressons ici tous nos sincères remerciements.

Nous présentons donc avec confiance cette dixième édition des *Formules-Tables.*

C'est à l'accueil du public que nous pourrons juger si nous avons réussi dans notre tâche.

L.-A. BARRÉ.

INTRODUCTION

DE LA PREMIÈRE ÉDITION (1846)

L'art de bien construire repose sur un certain nombre de principes, qui servent de base aux règles pratiques à suivre dans l'établissement d'un projet quelconque : depuis la machine la plus élémentaire jusqu'à la plus compliquée, de l'atelier du simple ouvrier jusqu'à ces usines et fabriques où des milliers de bras utilisent la force de moteurs qui étonnent par leur puissance et leurs mouvements majestueux, du chemin de culture aux belles lignes de chemins de fer, de la chétive habitation rustique aux palais les plus somptueux.

De ces principes, on conclut, d'après des considérations théoriques, des règles générales invariables, que la pratique modifie selon les diverses circonstances qui se rattachent à chacune d'elles.

Les règles théoriques s'expriment par des formules, également invariables, que posent ces hommes qui savent si bien analyser toutes les causes qui participent à un effet. Les règles pratiques s'expriment par les mêmes formules, mais en y faisant intervenir des coefficients pour tenir compte des circonstances qu'on ne peut analyser théoriquement : si l'on veut avoir, par exemple, le travail produit par la vapeur dans une machine à vapeur, il faut affecter l'expression théorique du travail qu'elle développe dans le cylindre d'un coefficient qui dépend du frottement des pièces de la machine, du refroidissement, des pertes de vapeur, etc., et qui, par suite, varie avec le système, les soins d'entretien et la force de la machine; si l'on calcule la section à donner à une pièce pour résister à un effort donné, il faut, pour tenir compte de la non-homogénéité de la matière, multiplier le résultat théorique par un coefficient qui varie selon la nature de la pièce, son mode de résister, et le degré de stabilité qu'on veut obtenir.

Quelques règles sont empiriques, c'est-à-dire que les formules qui les expriment sont posées de manière à représenter, aussi exactement que possible, les relations qui existent entre différents résultats pratiques, sans avoir égard à aucune considération théorique : telles sont, par exemple, les formules qui lient la température de la vapeur d'eau à sa force élastique.

Autant qu'on le peut, il faut déduire les formules pratiques des formules théoriques, parce que ces dernières généralisent, au lieu que celles purement pratiques ne font que réunir des résultats obtenus dans des cas particuliers, et qui souvent varient d'un lieu à un autre, d'une matière à une

autre, en un mot, suivant les mille circonstances différentes qui se présentent dans les applications.

Ainsi, la pratique doit s'appuyer sur la théorie; c'est en partant de ce point de vue que nous avons rédigé ce recueil de formules, tables et renseignements, afin qu'il soit utile aux savants, que les ingénieurs et architectes y trouvent des règles sûres pour établir leurs projets, et les constructeurs et ouvriers, tous les renseignements nécessaires à la bonne exécution de leurs travaux.

Nous avons, autant qu'il nous a été possible, cité l'auteur de chaque formule et de chaque renseignement, d'abord pour lui attribuer le mérite de son œuvre, et ensuite par ce qu'on retient mieux et applique plus sûrement une règle quand on connaît la source d'où elle découle; si nous avons fait quelques omissions, nous prions les personnes qui y sont intéressées de vouloir bien nous les faire connaître; c'est également avec la plus vive reconnaissance que nous recevrons leurs observations sur ce qui se trouve dans notre ouvrage, et les documents qui peuvent ne pas être à notre connaissance.

L'art de construire se divise en plusieurs parties; mais il y a des règles qui sont communes à toutes, et d'autres qui ne diffèrent que légèrement dans plusieurs d'entre elles: c'est afin de ne pas faire double emploi, et de bien montrer l'analogie qui existe entre les mêmes règles appliquées dans diverses circonstances, que nous les avons toutes réunies dans un même ouvrage. En suivant ces règles, les ingénieurs, les architectes et les constructeurs mettront en harmonie les différentes parties de leurs projets, donneront des dimensions convenables et des formes agréables à leurs pièces, et emploieront partout judicieusement la matière, d'où naîtront l'agréable, la commodité, la sécurité et l'économie.

Ouvrier d'abord, nous avons senti l'utilité de ce recueil; ingénieur, nous en comprenons toute l'importance; c'est ce qui nous a décidé à entreprendre un travail aussi pénible que difficile; heureux si nous avons atteint le but que nous nous étions proposé, car nous épargnerons du temps aux personnes qui sont à même de consulter des ouvrages spéciaux sur l'art de construire, et nous viendrons en aide à tous ces hommes laborieux qui se trouvent jusque dans les provinces les plus reculées, et qui, malgré leur talent naturel et leur pratique, ne commettent que trop souvent des erreurs dans les dispositions qu'ils adoptent et dans la manière dont ils emploient les matériaux. Si nous nous sommes rendu utile à nos anciens et nouveaux camarades, ce sera pour nous la plus belle récompense.

J. CLAUDEL.

TABLE ANALYTIQUE

DES MATIÈRES CONTENUES DANS LE TOME I

PREMIÈRE PARTIE

DES MOTEURS NATURELS ANIMÉS ET INANIMÉS

Définitions et principes.

Machines en général.

Frottement.

Cordes et courroies.

Machines simples.

Écoulement de l'eau.

Cours d'eau.

Tuyaux de conduite des eaux. — Distributions d'eau.

Égouts.

Moteurs hydrauliques.

Machines à élever l'eau.

Ascenseurs, Grues, Vérins.

Moulins à vent. Moulins à blé, à huile, etc.

Mouvement des gaz. Ventilateurs.

Résistance des matériaux.

DEUXIÈME PARTIE

PHYSIQUE INDUSTRIELLE

Nomenclature, notations, équivalents chimiques, etc.

Pesanteur spécifique.

Pouvoirs des corps pour la chaleur.

Évaluation des températures.

Dilatation. — Compressibilité.

Chaleur spécifique.

Chaleur latente.

Vapeurs.

Sources de froid.

Liquéfaction et solidification des gaz.

Combustibles.

Air nécessaire à la combustion.

Cheminées.

Métallurgie. — Fonderies.

Distillation.

Évaporation.

Électricité.

Lumière. — Son. — Projectiles de guerre.

Éclairage (656).

Séchage.

Chauffage.

Ventilation (354).

Exemples d'édifices chauffés et ventilés.

Hygrométrie.

Établissements insalubres.

Foyers.

Générateurs ou chaudières à vapeur (587).

Thermodynamique.

Nota. — La table générale de l'ouvrage, par ordre alphabétique, se trouve à la fin du tome II. La table analytique particulière au second volume se trouve au commencement du tome II.

ERRATA

Page 828, tableau en haut de la page; dans la dernière colonne, à droite, *lire :* 3.770 *au lieu de :* 3.765.

Page 828, 14ᵉ ligne, après le tableau, *lire :* brûlant avec une flamme de $0^m,05$ de haut, *au lieu de :* $0^m,50$.

Page 833, nᵒ 677, il est dit que la densité du gaz, par rapport à l'air, est de 0,55. En réalité ce chiffre de 0,55 n'est pas la densité, mais bien le poids de 1 litre de *gaz* (en grammes). Pour en déduire la densité, il faut prendre le rapport des *poids* d'un litre de gaz et d'un litre d'air, soit :

$$\frac{0{,}55}{1{,}293} = 0{,}42 \text{ environ.}$$

La densité réelle du gaz d'éclairage est donc environ 0,42, par rapport à l'air.

FORMULES,

TABLES ET RENSEIGNEMENTS PRATIQUES

AIDE-MÉMOIRE

DES INGÉNIEURS, DES ARCHITECTES, ETC.

PARTIE PRATIQUE

PREMIÈRE PARTIE

DES MOTEURS NATURELS ANIMÉS ET INANIMÉS

DÉFINITIONS ET PRINCIPES

1. Valeurs numériques usuelles. Dans ce qui va suivre, à moins qu'on exprime le contraire :

Un nombre placé entre parenthèses ( ) indique un numéro d'ordre à consulter.

Un nombre précédé de *Int.* ou de *Art.*, placé entre parenthèses, indique un numéro d'ordre de notre *Introduction à la science de l'ingénieur* (7e édition) ou de notre *Pratique de l'art de construire* (5e édition) à consulter.

Les longueurs sont exprimées en mètres;

Les surfaces, en mètres carrés;

Les volumes, en mètres cubes;

Les temps, en secondes;

Les vitesses, en mètres parcourus par seconde;

Les forces, en kilogrammes;

Les quantités de travail, en kilogrammètres (33);

$\pi = 3{,}141\,5926...$, ou à peu près 3,1416, ou même 3,14 : c'est le rapport approché de la circonférence au diamètre (*Int.* 715).

$\pi = 3{,}141\,5926$

$\pi^2 = 9{,}869\,6044$

$\pi^3 = 31{,}006\,2767$

$\sqrt{\pi} = 1{,}772\,4539$

$\sqrt[3]{\pi} = 1{,}464\,5919$

$\frac{1}{\pi} = 0{,}318\,3099$

$\frac{1}{\pi^2} = 0{,}101\,3210$

$\frac{1}{\pi^3} = 0{,}032\,2515$

$\sqrt{\frac{1}{\pi}} = 0{,}564\,1896$

$\sqrt[3]{\frac{1}{\pi}} = 0{,}682\,7841$

$\log \pi = 0{,}497\,1499$

$\log \pi^2 = 0{,}994\,2997$

$\log \pi^3 = 1{,}491\,4496$

$\log \sqrt{\pi} = 0{,}248\,5749$

$\log \sqrt[3]{\pi} = 0{,}165\,7166$

$\log \frac{1}{\pi} = \bar{1}{,}502\,8501$

$\log \frac{1}{\pi^2} = \bar{1}{,}005\,7003$

$\log \frac{1}{\pi^3} = \bar{2}{,}508\,5504$

$\log \sqrt{\frac{1}{\pi}} = \bar{1}{,}751\,4251$

$\log \sqrt[3]{\frac{1}{\pi}} = \bar{1}{,}834\,2834$

g accélération de vitesse due à la pesanteur (18).

$g = 9,8088$	$\frac{1}{4g^2} = 0,0026$	$\log \frac{1}{2g} = \bar{2},7073541$
$2g = 19,6176$		
$g^2 = 96,21256$	$\sqrt{\frac{1}{g}} = 0,31929$	$\log \frac{1}{g^2} = \bar{2},0167682$
$4g^2 = 384,85024$		
$\sqrt{g} = 3,13190$	$\sqrt{\frac{1}{2g}} = 0,22578$	$\log \frac{1}{4g^2} = \bar{3},4147082$
$\sqrt{2g} = 4,42918$		
$\frac{1}{g} = 0,10195$	$\sqrt{\frac{2}{g}} = 0,45155$	$\log \sqrt{\frac{1}{g}} = \bar{1},5041921$
$\frac{1}{2g} = 0,050975$	$\log g = 0,9916159$	$\log \sqrt{\frac{1}{2g}} = \bar{1},3536771$
	$\log 2g = 1,2926459$	
$\frac{1}{g^2} = 0,01039$	$\log \frac{1}{g} = \bar{1},0083941$	$\log \sqrt{\frac{2}{g}} = \bar{1},6547071$

Dans la pratique, pour abréger les calculs, on prend le plus souvent les valeurs précédentes à moins d'une unité décimale du 2[e] ou du 3[e] ordre : ainsi l'on fait, par exemple, $g = 9,81$, $\frac{1}{g} = 0,102$, $\frac{1}{2g} = 0,051$, $\sqrt{2g} = 4,43$.

2. La propriété que possède la matière, de ne pas pouvoir par elle-même passer de l'état de repos à celui de mouvement, ni modifier le mouvement dont elle est animée, est ce qu'on appelle son *inertie* (*Int.* 1448).

3. Une **force** est la cause qui modifie ou tend à modifier l'état de repos ou de mouvement d'un corps (*Int.* 1449).

4. Le **mouvement** d'un corps est dit *uniforme*, quand les longueurs des chemins parcourus dans des temps égaux quelconques sont égales.

5. Dans le mouvement uniforme, la *vitesse* est l'espace parcouru pendant l'unité de temps, ou qui serait parcouru pendant cette unité si le mouvement était suffisamment prolongé.

De cette définition et de la précédente, il résulte que la vitesse est constante pendant toute la durée du mouvement uniforme.

6. Dans le mouvement uniforme, la relation entre l'espace parcouru, la vitesse et le temps est (*Int.* 1454) :

$$E = vt, \quad \text{d'où} \quad v = \frac{E}{t}, \quad \text{et} \quad t = \frac{E}{v}.$$

E espace parcouru pendant le temps t ;
v vitesse (5) ;
t durée du mouvement.

Application. Quel est l'espace parcouru pendant 3′, la vitesse étant de 4 mètres par seconde?

Faisant $v = 4$ et $t = 60 \times 3 = 180$ dans la première des formules précédentes, on a :

$$E = 4 \times 180 = 720 \text{ mètres.}$$

7. Le *mouvement* d'un corps est dit *varié* lorsque les espaces parcourus dans des temps égaux quelconques sont inégaux; il en résulte que la

vitesse n'est pas constante pendant toute la durée du mouvement; dans ce cas, les relations du n° 6 n'existent plus.

8. Mouvement périodique uniforme. C'est celui dans lequel le mobile parcourt certains espaces égaux dans des temps égaux, sans que la même condition soit remplie pour les fractions de ces espaces.

Un de ces espaces est le chemin parcouru pendant une *période*, et le temps employé à le parcourir est la *durée de la période*.

Prenant la durée d'une période pour unité de temps et le chemin parcouru pendant cette unité de temps pour vitesse v, l'espace E, la vitesse v, et le temps t, qui exprime un nombre entier de durées de périodes, sont liés par les relations du n° 6.

9. Vitesse dans le mouvement varié. Quoique la vitesse puisse ne pas être la même à deux instants successifs du mouvement, on peut la considérer comme constante pendant une fraction infiniment petite de la durée du mouvement; alors, à l'instant considéré, *la vitesse est égale à l'espace infiniment petit divisé par le temps infiniment petit employé à le parcourir*, ou bien encore, *à l'espace qui serait parcouru pendant l'unité de temps si, à partir de l'instant considéré, le mobile se mouvait avec une vitesse constante égale à celle qu'il a acquise à cet instant* (5).

Désignant par dE l'espace infiniment petit parcouru, et par dt le temps infiniment petit employé à le parcourir, la vitesse est donc:

$$v=\frac{dE}{dt}.$$

Dans la pratique, il est impossible de prendre dE et dt infiniment petits, et par suite d'avoir v exactement; mais la valeur que l'on trouvera pour cette quantité se rapprochera d'autant plus de la vitesse, que dE et dt seront pris plus petits. Si l'espace est une fonction connue de temps, il est facile d'exprimer exactement la vitesse.

Traçant une courbe ayant les valeurs de t pour abscisses et celles correspondantes de E pour ordonnées, la vitesse v après un temps t est représentée en grandeur et en signe par la tangente trigonométrique de l'angle que forme avec l'axe des t la tangente menée à la courbe au point correspondant à t (*Int.* 1458, 1753).

10. Variation de la vitesse dans le mouvement varié. v étant la vitesse du mobile à la fin du temps t, après le temps t plus le temps infiniment petit dt, elle a augmenté ou diminué d'une quantité infiniment petite dv et elle est devenue $v \pm dv$, les quantités v et dv ayant des signes quelconques.

dv étant la variation de la vitesse pendant le temps dt (augmentation ou diminution de vitesse), la variation moyenne est, par unité de temps, pendant le temps dt:

$$dv \times \frac{1}{dt}=\frac{dv}{dt}.$$

Cette valeur, qui a le signe de dv, est la quantité dont varierait la

vitesse pendant l'unité de temps qui succéderait à t, si pour chaque instant $\mathrm{d}t$ de cette unité l'augmentation de la vitesse était constante et égale à $\mathrm{d}v$.

$\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}}$, que nous représenterons par j, s'appelle l'*accélération de vitesse pendant l'unité de temps*, ou simplement l'*accélération de vitesse* à l'instant considéré, c'est-à-dire à l'instant qui succède au temps t.

Les tangentes à une courbe ayant les valeurs de t pour abscisses et celles correspondantes de v pour ordonnées fournissent les valeurs de j, comme les tangentes à la courbe dont il est question au n° 9 donnent celles de v (*Int.* 1459, 1753).

11. Lorsque la vitesse v et l'accélération j sont de même signe, c'est-à-dire à la fois toutes deux positives ou toutes deux négatives, le *mouvement* est *accéléré*, dans le sens vulgaire de ce mot; si, au contraire, ces deux quantités sont de signes différents, le *mouvement* est *retardé*.

12. Lorsque l'accélération j est constante, le *mouvement* est dit *uniformément varié*.

13. **Expression de la vitesse dans le mouvement uniformément varié.** j étant l'accélération de vitesse pendant chaque unité de temps, pendant une seconde par exemple, après le temps quelconque t secondes, elle devient jt, et il en résulte que le corps possédant au commencement du temps t une vitesse v_0, après ce temps il possède la vitesse :

$$v = v_0 + jt.$$

L'accélération j est positive ou négative, selon qu'elle tend à augmenter ou à diminuer v_0.

De l'équation précédente on tire :

$$j = \frac{v - v_0}{t} \quad \text{et} \quad \frac{v - v_0}{j}.$$

Ainsi l'accélération j est algébriquement égale au quotient de la division par t de la variation $v - v_0$ de la vitesse pendant le temps t; elle a le même signe que $v - v_0$.

Quand le corps part du repos, on a $v_0 = 0$, et par suite :

$$v = jt, \quad \text{d'où} \quad j = \frac{v}{t} \quad \text{et} \quad t = \frac{v}{j}.$$

j a alors le même signe que v.

v_0 est ce qu'on appelle la *vitesse initiale*. Adoptant un sens de la ligne que suit le mobile comme positif et l'autre comme négatif, les signes de v_0 et j sont déterminés, et l'on a d'une manière générale :

$$v = \pm v_0 \pm jt.$$

14. **Expression de l'espace parcouru dans le mouvement uniformément varié** (*Int.* 1464).

1° Le mouvement étant uniformément accéléré, on a :

$$E = v_0 t + \frac{1}{2} j t^2.$$

E espace parcouru pendant le temps t;
t temps pendant lequel on considère le mouvement;
v_0 vitesse initiale;
j accélération de vitesse (10).

2° Quand le mouvement est uniformément retardé, la quantité $\frac{1}{2}jt^2$ est négative, et après le temps t on a :

$$E = v_0 t - \frac{1}{2} j t^2.$$

3° Si au commencement du temps t, le mobile avait déjà parcouru l'espace E_0 (compté à partir d'un point pris pour origine des distances), après ce temps t l'espace total parcouru serait :

$$E = E_0 + v_0 t + \frac{1}{2} j t^2.$$

4° Dans le cas où la vitesse initiale $v_0 = 0$, la formule 1° devient :

$$E = \frac{1}{2} j t^2; \qquad (a)$$

et pour $t = 1$, on a :

$$E = \frac{1}{2} j, \quad \text{d'où} \quad j = 2E.$$

Ainsi, *le mobile partant du repos : 1° l'espace* E *parcouru pendant la première unité de temps est moitié de la vitesse* j *acquise à la fin de cette unité*, c'est-à-dire *moitié de l'accélération; 2° l'accélération est double du chemin parcouru après la première unité de temps.*

Remplaçant dans la formule (*a*) j par sa valeur en fonction de v (13), on a aussi :

$$E = \frac{1}{2} vt, \quad \text{d'où} \quad v = \frac{2E}{t} \quad \text{et} \quad t = \frac{2E}{v}.$$

Ce qui montre que *le mobile partant du repos, l'espace* E *parcouru pendant un temps quelconque* t *est égal à la moitié de la vitesse* v *multiplié par* t, *c'est-à-dire égal à la moitié de l'espace* vt *qui serait parcouru pendant un temps égal sous l'influence d'un mouvement uniforme de vitesse* v.

Remarque. Prenant une origine de distance sur la ligne que décrit le mobile, la distance à laquelle ce mobile se trouve du point fixe est, dans tous les cas, représentée par la formule générale :

$$E = \pm E_0 \pm v_0 t \pm \frac{1}{2} j t^2.$$

15. L'action continue d'une force constante sur un corps produit un mouvement uniformément varié (*Int.* 1477). Ainsi, lorsqu'un corps possède un mouvement uniforme, c'est qu'il n'est sollicité par aucune

force, ou que les forces qui le sollicitent se font équilibre entre elles (*Int.* 1478).

16. Un corps quelconque, quelles que soient sa nature et la quantité de matière qui le compose, abandonné à lui-même, se meut ou tend à se mouvoir vers le centre de la terre. La cause inconnue qui produit cet effet se nomme *pesanteur* ou *gravité* (*Int.* 1465).

17. *Le poids d'un corps* est la résultante des actions de la pesanteur sur toutes les molécules de ce corps (*Int.* 1469).

18. Application des formules du mouvement uniformément varié au cas de la pesanteur. Le poids d'un corps étant, dans les limites de nos observations, une force à très peu près constante qui agit d'une manière permanente sur le corps, il en résulte que si ce corps n'est soumis qu'à l'action de la pesanteur, il prendra dans le vide un mouvement uniformément accéléré (11). C'est en effet ce que vérifie l'expérience, qui a de plus fait voir que l'accélération de vitesse j, qu'on a l'habitude de représenter par g lorsqu'il s'agit de la pesanteur, était, à l'Observatoire de Paris, et en réduisant les observations au niveau de la mer, égale à $9^m,8088$ par seconde.

Lorsque le corps se meut dans l'air, il éprouve, pour déplacer ce fluide, une résistance qui diminue son mouvement. Cette résistance augmente rapidement avec la vitesse. Mais lorsque la vitesse du corps n'est pas considérable et que sa section (horizontale) est faible par rapport à son poids, on peut supposer, sans erreur sensible, dans le cas ordinaire de la chute des corps, qu'il se meut dans l'air comme dans le vide.

Les formules du mouvement uniformément varié sont, pour le cas de la pesanteur :

1° $$v = \pm v_0 \pm gt; \qquad (13)$$

2° $$E = \pm E_0 \pm v_0 t \pm \frac{1}{2} g t^2. \qquad (14)$$

Faisant $E_0 = 0$, et $v_0 = 0$, cette dernière formule devient, en prenant le signe $+$:

$$E = \frac{1}{2} g t^2, \qquad (a)$$

ou, en remplaçant g par sa valeur en fonction de v :

$$E = \frac{1}{2} v t.$$

Ce qui a déjà été établi pour un mouvement uniformément accéléré quelconque (14).

Pour $t = 1''$, la formule (a) donne :

$$E = \frac{1}{2} g = 4^m,9044.$$

Ce qui fait voir que l'espace parcouru pendant la première seconde

par un corps qui tombe librement dans le vide, en partant du repos, est égal à $4^m,9044$, moitié de la vitesse acquise après ce temps (*Int.* 1472).

19. Application de ces formules à la chute des corps (*Int.* 1473). La vitesse initiale v_0 étant nulle, c'est-à-dire le corps partant du repos et t étant la durée de la descente, la vitesse acquise après ce temps est (13) :

$$v = gt, \quad \text{d'où} \quad t = \frac{v}{g}. \qquad (a)$$

Supposant $E_0 = 0$, h étant l'espace parcouru, c'est-à-dire la hauteur de laquelle le corps est tombé après un temps t, on a (4°, 14) :

$$h = \frac{1}{2} g t^2, \quad \text{d'où} \quad t = \sqrt{\frac{2h}{g}}. \qquad (b)$$

Quant à la vitesse qu'acquiert un corps en tombant d'une hauteur donnée h, remplaçant dans la formule (a) t par sa valeur (b), on a :

$$v = g\sqrt{\frac{2h}{g}} = \sqrt{2gh}, \quad \text{d'où} \quad h = \frac{v^2}{2g}. \qquad (c)$$

Ces formules sont données pour le cas de la pesanteur; mais des formules des n°s 13 et 14, et en opérant comme ci-dessus, on en conclurait de tout à fait semblables pour un mouvement uniformément varié quelconque; h serait remplacée par E et g par j.

20. Le poids P d'un corps (17) divisé par g (18) est la *masse* de ce corps (*Int.* 1485).

P et g variant dans le même rapport, la masse $\frac{P}{g}$ d'un corps est la même dans tous les lieux.

21. Relation entre les forces, les vitesses et les masses des mobiles sollicités (*Int.* 1480 et suivants). On dit que deux *forces* sont *égales*, lorsqu'elles sont capables d'imprimer le même mouvement à un même mobile, et que les *masses* de deux mobiles sont *égales*, lorsque deux forces égales impriment le même mouvement à ces mobiles. De là on conclut :

1° Que, *pour un même mobile, les forces sont proportionnelles aux accélérations de vitesse;* ainsi l'on a (*Int.* 1481) :

$$F : f = J : j.$$

F l'une des forces;
f l'autre force;
J accélération de vitesse due à la force F;
j *id.* *id.* f.

Supposant les mobiles partis du repos, $V = Jt$ et $v = jt$ étant les vitesses acquises après le même temps t (13), on a $V : v = J : j$, et par suite :

$$F : f = V : v.$$

Ce qui fait voir que ***les forces sont proportionnelles aux vitesses qu'elles communiquent à un même mobile dans le même temps.***

Dans cette même hypothèse, les espaces parcourus étant proportionnels aux accélérations et aux vitesses (14), on a aussi :

$$F : f = E : e.$$

2° Que, ***pour une même accélération de vitesse*** (10), ***les forces sont proportionnelles aux masses des mobiles;*** ainsi l'on a (*Int.* 1488) :

$$F : f = M : m.$$

M masse du mobile sollicitée par la force F;
m masse du mobile sollicitée par la force f.

Les poids P et p étant proportionnels aux masses M et m, on a aussi :

$$F : f = P : p.$$

3° Que ***deux forces quelconques sont proportionnelles aux produits des masses*** M ***et*** m ***ou des poids*** P ***et*** p ***des mobiles qu'elles sollicitent par les accélérations de vitesse qu'elles leur communiquent;*** ainsi l'on a :

$$F : f = MJ : mj \quad \text{et} \quad F : f = PJ : pj, \qquad (a)$$

ou encore, à cause de la proportion $V : v = J : j$ (1°),

$$F : f = MV : mv \quad \text{et} \quad F : f = PV : pv.$$

Ce qui fait voir que ***les forces sont proportionnelles aux produits des masses ou des poids par les vitesses.***

Si les deux forces sont égales, des relations du 3° on conclut :

$$J : j = m : M, \quad J : j = p : P, \quad V : v = m : M, \quad V : v = p : P.$$

Ce qui montre que les accélérations ou les vitesses sont en raison inverse des masses ou des poids.

22. Appelant ***unité de masse,*** la masse du mobile qui prend l'unité d'accélération de vitesse dans l'unité de temps quand il est sollicité par ***l'unité de force,*** il en résulte que faisant dans la première des proportions précédentes (a) $f = 1$ et $j = 1$, d'où $m = 1$ et $mj = 1$, on a :

$$F = MJ.$$

Ce qui fait voir que ***l'intensité d'une force quelconque est représentée par le produit de la masse par l'accélération de vitesse que la force communique au mobile dans l'unité de temps.***

De la formule précédente on tire :

$$M = \frac{F}{J} \quad \text{et} \quad J = \frac{F}{M}.$$

23. Si la force F est le poids P du corps dont la masse est M, $g = 9^{m},8088$,

g étant l'accélération de vitesse (18), les trois formules précédentes deviennent respectivement :

$$P = Mg, \quad M = \frac{P}{g} \quad \text{et} \quad g = \frac{P}{M}.$$

Ces nouvelles formules font voir :

1° *Que le poids d'un corps est égal à sa masse multipliée par l'accélération* g *due à la pesanteur.*

Pour

$$M = 1, \quad \text{on a} \quad P = g = 9^k,8088.$$

Ainsi le poids d'un corps dont la masse est égale à l'unité est 9ᵏ,8088;

2° *Que la masse est égale au poids divisé par* g.

Pour

$$P = 1 \quad \text{on a} \quad M = \frac{1}{g} = \frac{1}{9,8088} = 0,102. \qquad (\text{n}^\circ\ 1)$$

Ce qui montre que *la masse d'un corps du poids de* 1 *kil. est* 0,102;

3° *Que l'accélération* g *due à la pesanteur est égale au poids du corps divisé par sa masse.*

24. Deux forces étant proportionnelles aux accélérations qu'elles communiquent à un même mobile (21), l'une des forces étant le poids du mobile, on a :

$$F : P = J : g, \qquad (a)$$

proportion qui donne l'accélération J constante qu'une force quelconque F communique par seconde à un mobile dont le poids est P. Pour $F = 10^k$, et $P = 25^k$, on a :

$$J = g\frac{F}{P} = 9,8088\ \frac{10}{25} = 3^m,9235.$$

Ayant J, on peut déterminer la vitesse v que possède le mobile et l'espace E qu'il a parcouru pendant le temps t. Ainsi pour $t = 8''$, par exemple, on a :

$$v = Jt = 3,9235 \times 8 = 31^m,388,$$

et

$$E = \frac{1}{2}Jt^2 = \frac{1}{2}vt = \frac{31,388 \times 8}{2} = 125^m,552.$$

La proportion (a) *donne aussi la force* F *qu'il faut appliquer à un mobile de poids* P *pour lui communiquer une vitesse* v *après un certain temps* t *ou pour lui faire parcourir un espace* E *pendant le temps* t.

Avec les données précédentes, on a d'abord (14) :

$$v = \frac{2E}{t} = \frac{2 \times 125,552}{8} = 31^m,388;$$

puis :

$$J = \frac{v}{t} = \frac{31,388}{8} = 3^{m},9235,$$

et la proportion (*a*) donne :

$$F = P\frac{J}{g} = \frac{25 \times 3,9235}{9,8088} = 10^{k}.$$

25. L'*impulsion d'une force* est le produit de son intensité par la durée de son action. Ainsi, une force de 12^{k} agissant sur un corps pendant 8″ produit une impulsion représentée par $12 \times 8 = 96$.

26. Le produit mv de la masse m d'un corps par la vitesse v qu'il possède à un certain instant, prend le nom de *quantité de mouvement.*

Le poids d'un corps étant 50^{k}, d'où il résulte que sa masse est (23) $\frac{P}{g} = 50 \times 0,102 = 5,10$, et la vitesse qu'il possède étant 30 mètres, sa quantité de mouvement est représentée par :

$$mv = 5,10 \times 30 = 153.$$

27. Égalité entre l'impulsion et la quantité de mouvement (*Int.* 1494). Lorsque le mouvement est uniformément accéléré, on a (13), en remarquant que l'accélération $j = \frac{F}{m}$ (22) :

$$v = v_0 + \frac{F}{m}t;$$

d'où l'on tire :

$$Ft = mv - mv_0. \qquad (a)$$

Ft est l'impulsion de la force F; elle a le signe de F.

mv est la quantité de mouvement du mobile après le temps t, et mv_0 est la quantité de mouvement au commencement du temps t; ces quantités ont respectivement les signes de v et de v_0.

La formule (*a*) fait voir que *l'impulsion et la différence des quantités de mouvement sont toujours égales et de même signe.* Ce que l'on peut énoncer en disant que *l'impulsion est toujours égale au gain ou à la perte de la quantité de mouvement.*

Considérant toujours la vitesse initiale v_0 comme positive, il y aura gain de quantité de mouvement lorsque la force F sera positive, c'est-à-dire lorsqu'elle agira dans le sens de v_0, et perte lorsqu'elle sera négative.

Trois quelconques des quatre quantités F, t, m et $(v - v_0)$ étant connues, l'équation (*a*) mise sous la forme :

$$Ft = m(v - v_0),$$

fait connaître la quatrième.

Pour $v_0 = 0$, c'est-à-dire quand le corps part du repos, on a :

$$Ft = mv.$$

Ce qui fait voir que *l'impulsion d'une force est égale à la quantité de mouvement que cette force communique au corps qu'elle sollicite pendant la durée du mouvement.*

Application. *Trouver la force* F *capable de réduire au repos en* 5″ *un corps dont le poids est de* 50 *kil., ce corps étant animé d'une vitesse de* 15 *mètres par seconde.*

Substituant ces nombres dans la formule ci-dessus, elle devient :

$$F \times t = -0{,}102 \times 50 \times 15, \quad \text{d'où} \quad F = -\frac{0{,}102 \times 50 \times 15}{5} = -15^k{,}30.$$

Cette force est nécessairement opposée à la pesanteur.

28. *Le travail d'une force est le produit de son intensité par la projection, sur la direction de la force, de l'espace parcouru par le point d'application.* Ainsi l'espace parcouru étant rectiligne, on a, en représentant par $\mathcal{T}$ ce travail :

$$\mathcal{T} = F \times E \cos \alpha. \qquad (a)$$

$\mathcal{T}$ travail produit ;
F intensité de la force ;
E espace parcouru par le point d'application ;
α angle que fait la direction de la force avec celle de l'espace parcouru (*Int.* 1062).

Quand $\alpha = 0$, c'est-à-dire quand le point d'application se meut dans la direction de la force, on a :

$$\cos \alpha = 1, \quad \text{et, par suite,} \quad \mathcal{T} = F \times E.$$

Ainsi, dans ce cas, *le travail est le produit de la force par l'espace parcouru.*

Intervertissant l'ordre des facteurs dans le second membre de l'équation (*a*), on a :

$$\mathcal{T} = E \times F \cos \alpha,$$

ce qui fait voir que le *travail est aussi égal à l'espace parcouru* E *multiplié par la projection* $F \cos \alpha$ *de la force sur la direction de cet espace* (*Int.* 1496 et suivants).

29. La moitié $\frac{1}{2}mv^2$ du produit de la masse m d'un corps par le carré v^2 de la vitesse qu'il possède prend le nom de *puissance vive.* Le produit mv^2 est nommé *force vive* par quelques auteurs (*Int.* 1499).

30. Dans le mouvement uniformément accéléré, on a (13 et 14), en faisant $j = \frac{F}{m}$ (22) :

$$v = v_0 + \frac{F}{m}t, \quad \text{et} \quad E = E_0 + v_0 t + \frac{1}{2}\frac{F}{m}t^2.$$

Éliminant t entre ces deux équations, on conclut (*Int.* 1500) :

$$F(E - E_0) = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2. \qquad (a)$$

$E - E_0$ étant le chemin parcouru pendant l'action de la force F, $F(E - E_0)$ est le travail $\mathcal{T}$ produit par F pendant cette même durée d'action (28).

$\frac{1}{2}mv_0^2$ étant la puissance vive au commencement de l'action de la force F, et $\frac{1}{2}mv^2$ la puissance vive à la fin de cette action, comme de plus les quantités $\frac{1}{2}mv_0^2$ et $\frac{1}{2}mv^2$ sont toujours positives, l'équation (a) fait voir que la quantité de travail est toujours algébriquement égale à la différence des puissances vives calculées avant et après l'action; ainsi, considérant comme gain de puissance vive une différence positive, et comme perte une différence négative, on peut énoncer le théorème général des puissances vives :

Le travail produit par une force agissant sur un corps est toujours égal au gain ou à la perte de puissance vive que fait ce corps pendant l'action de la force.

Nota. — L'expression du travail d'une force en fonction des puissances vives est d'un usage très fréquent en mécanique (*Int.* 1501).

31. Dans le cas où $v_0 = 0$ et $E_0 = 0$, c'est-à-dire quand le corps part du repos et que les espaces sont comptés à partir du point de départ, la formule précédente (a) donne :

$$\mathcal{T} = FE = \frac{1}{2}mv^2.$$

Remplaçant m par $\frac{P}{g}$ (23), on a :

$$\mathcal{T} = FE = \frac{Pv^2}{2g},$$

nouvelle expression du travail dont on fait usage dans les applications.

32. Comme $\frac{v^2}{2g} = h$, h étant la hauteur correspondant à la vitesse v (19), on a :

$$\mathcal{T} = FE = Ph.$$

Le travail produit par une force quelconque est donc égal au poids du corps sollicité multiplié par la hauteur correspondant à la vitesse communiquée à ce corps, c'est-à-dire qu'il est égal au travail qui serait produit par le poids P descendant de la hauteur h, ou à celui qu'il faudrait produire pour élever ce poids à la hauteur h.

33. **Kilogrammètre.** Ainsi le travail produit par une force quelconque peut toujours être ramené à un poids élevé à une certaine hauteur.

Aussi a-t-on adopté pour *unité de travail*, le travail dû au poids d'un kilogramme élevé à un mètre de hauteur. Ce travail est appelé *kilogrammètre*, et on le représente par 1^{km}.

F étant exprimée en kilogrammes et E en mètres, le travail est donc (32) :

$$\mathcal{T} = FE^{km}.$$

34. Quand F est exprimée en unités de 1000 kilogrammes, le produit FE représente le travail en unités de 1000^{km}, que l'on appelle *grandes unités dynamiques*.

35. Le produit FE^{km} mesure un travail indépendant du temps pendant lequel il a été produit; mais on conçoit que pour comparer les puissances dynamiques des forces ou des moteurs quelconques, il faut comparer les travaux produits dans un temps donné; ainsi les forces F et F′ produisant respectivement FE^{km} et $F'E'^{km}$ en une seconde, il en résulte que les puissances dynamiques des deux forces sont dans le rapport de FE à F′E′.

36. Cheval-vapeur. Afin de pouvoir énoncer la puissance dynamique d'une force, ou comparer les effets dynamiques des différentes forces dans des temps égaux, on a adopté une unité de travail dépendant du temps. Cette unité, qu'on appelle *cheval-vapeur*, équivaut à 75^{km} produits dans une seconde.

Le cheval-vapeur est d'un usage continuel pour évaluer la puissance des machines. Quand on dit qu'une machine est de la puissance dynamique de 10 chevaux, par exemple, ou improprement de la *force* de 10 chevaux, cela veut dire que le travail dynamique produit par la machine en une seconde équivaut à $75 \times 10 = 750^{km}$.

Le cheval vivant produit moins de 75^{km} par seconde; ainsi un cheval de force moyenne, attelé à une voiture et allant au pas, produit une traction de 70 kilogrammes avec une vitesse de $0^{m},90$ par seconde; ce qui fait une puissance dynamique de 63^{km} par seconde ou $\frac{63}{75}$ de cheval-vapeur ou 0,84.

De plus, comme un cheval vivant ne peut travailler que 8 heures sur 24, il en résulte que dans un travail continu un cheval-vapeur remplace plus de trois chevaux (environ 3 1/2).

MOTEURS ANIMÉS

Nous donnons ci-après un tableau faisant connaître les quantités de travail journalières fournies par les moteurs animés, tels que l'homme, le cheval, le mulet, le bœuf, etc., dans diverses circonstances de travaux.

37. *Tableau des quantités de travail moyennes et journalières produites par les moteurs animés dans diverses circonstances.*

NATURE DU TRAVAIL.	POIDS élevé ou effort moyen exercé.	VITESSE par seconde.	TRAVAIL par seconde.	DURÉE du travail journalier.	QUANTITÉ de travail journalière.
1° ÉLÉVATION VERTICALE DES POIDS.	kilog.	mètres.	km.	heures.	km.
Un homme montant une rampe douce ou un escalier, sans fardeau, son travail consistant dans l'élévation du poids de son corps.	65	0,15	9,75	8	280800
Un manœuvre élevant des poids avec une corde et une poulie, ce qui l'oblige à faire descendre la corde à vide.	18	0,20	3,6	6	77760
Un manœuvre élevant des poids en les soulevant avec la main.	20	0,17	3,4	6	73440
Un manœuvre élevant des poids en les portant sur son dos au haut d'une rampe douce ou d'un escalier, et revenant à vide.	65	0,04	2,6	6	56160
Un manœuvre élevant des matériaux avec une brouette en montant une rampe au 1/12, et revenant à vide.	60	0,02	1,2	10	43200
Un manœuvre élevant des terres à la pelle à la hauteur moyenne de 1m,60.	2,7	0,40	1,08	10	38880
2° ACTION SUR LES MACHINES ET OUTILS.					
Un manœuvre agissant sur une roue à chevilles ou à tambour :					
1° Au niveau de l'axe de la roue	60	0,15	9	8	259200
2° Vers le bas de la roue ou à 24°	12	0,70	8,4	8	241920
Un manœuvre marchant et poussant ou tirant horizontalement d'une manière continue.	12	0,60	7,2	8	207360
Un manœuvre agissant sur une manivelle.	8	0,75	6	8	172800
Un manœuvre exercé poussant et tirant alternativement dans le sens vertical.	6	0,75	4,5	10	162000
Un cheval attelé à une voiture et allant au pas	70	0,90	63	10	2168000
Un cheval attelé à une voiture et allant au trot.	44	2,20	96,8	4,5	1568160
Un cheval attelé à un manège et allant au pas	45	0,90	40,5	8	1166400
Un cheval attelé à un manège et allant au trot.	30	2,00	60	4,5	972000
Un bœuf attelé à un manège et allant au pas.	60	0,60	36	8	1036800
Un mulet attelé à un manège et allant au pas.	30	0,90	27	8	777600

NATURE DU TRAVAIL.	POIDS élevé ou effort moyen exercé.	VITESSE par seconde.	TRAVAIL par seconde.	DURÉE du travail jour-nalier.	QUANTITÉ de travail journalière.
Un âne attelé à un manège et allant au pas.	kilog. 14	mètres. 0,80	km. 11,2	heures. 8	km. 322560
3° TRANSPORT HORIZONTAL DES POIDS.					
Un homme marchant sur un chemin horizontal, sans fardeau, son travail consistant dans le transport du poids de son corps	65	1,50	97,5	10	3510000
Un manœuvre transportant des matériaux dans une petite charrette ou camion à deux roues, et revenant à vide chercher de nouvelles charges.	100	0,50	50	10	1800000
Un manœuvre transportant des matériaux dans une brouette, et revenant à vide chercher de nouvelles charges.	60	0,50	30	10	1080000
Un homme voyageant en transportant des fardeaux sur son dos	40	0,75	30	7	756000
Un manœuvre transportant des matériaux sur son dos, et revenant à vide chercher de nouvelles charges..	65	0,50	32,5	6	702000
Un manœuvre transportant des fardeaux sur une civière, et revenant à vide chercher de nouvelles charges.	50	0,33	16,5	10	594000
Un manœuvre employé à jeter de la terre au moyen de la pelle, à 4 mètres de distance horizontale	2,7	0,68	1,8	10	64800
Un cheval transportant des fardeaux sur une charrette, et marchant au pas continuellement chargé	700	1,10	770	10	27720000
Un cheval attelé à une voiture, et marchant au trot continuellement chargé.	350	2,20	770	4,5	12474000
Un cheval transportant des fardeaux sur une charrette, au pas, et revenant à vide chercher de nouvelles charges . . .	700	0,60	420	10	15120000
Un cheval chargé sur le dos et allant au pas.	120	1,10	132	10	4752000
Un cheval chargé sur le dos et allant au trot.	80	2,20	176	7	4435000

Les résultats de la troisième partie de ce tableau expriment des effets utiles proprement dits, c'est-à-dire que le poids des machines et outils qui ont servi au transport ne sont pas compris dans les nombres qui indiquent les charges traînées; de plus, ces résultats supposent les routes d'une viabilité ordinaire.

38. *Les moteurs animés peuvent faire varier, dans de certaines limites, l'effort produit, la vitesse et la durée du travail journalier;* mais l'expérience prouve qu'un tel moteur fournit le maximum d'effet journalier : 1° quand l'effort qu'il produit varie de 1/3 à 1/5 de celui qu'il pourrait produire sans vitesse, pendant un temps peu prolongé; 2° quand la vitesse varie de 1/4 à 1/6 pour l'homme, et de 1/12 à 1/15 pour le cheval, de la plus grande vitesse que ces moteurs pourraient prendre, pendant un temps peu prolongé, en ne produisant aucun effort; 3° quand la durée de travail journalier varie de 1/2 à 1/3 du temps le plus prolongé pendant lequel le travail peut être constamment soutenu, sans nuire à la santé de l'homme ou des animaux; ce temps ne peut dépasser dix-huit heures par jour, quelque petite que soit la tâche journalière, ne consisterait-elle qu'en une présence constante dans les ateliers.

39. *Voici quelques résultats que nous extrayons du Traité des Moteurs*, par Courtois, ingénieur en chef des ponts et chaussées :

Un homme d'une taille moyenne et d'une force ordinaire pèse 70 kilogrammes, y compris ses vêtements.

Le plus grand effort qu'il puisse exercer en tirant ou poussant horizontalement est de 50 à 60 kilogrammes.

L'effort que l'homme peut exercer avec les bras est d'environ 80 kilogrammes.

Le plus grand poids qu'il peut porter est ordinairement de 150 kilogrammes, et s'élève parfois à 450 kilogrammes; celui qu'il peut soulever varie de 200 à 300 kilogrammes.

La vitesse du coureur peut être de 13 mètres par seconde pendant quelques instants; la vitesse ordinaire est de 7 mètres, celle de la marche d'environ 2 mètres, et celle du voyageur $1^m,60$.

La force moyenne des femmes est égale à celle d'un adulte de 15 à 16 ans, et ne surpasse pas les deux tiers de celle de l'homme.

Un ouvrier exercé, de même force qu'un autre, fait souvent un travail double et même triple sans éprouver plus de fatigue.

Un manœuvre qui monte un escalier sans charge, prend, pendant un travail journalier de 8 heures, une vitesse de $0^m,15$.

Le pas horizontal de l'homme est de $0^m,65$. La plus grande hauteur verticale que l'homme qui travaille puisse franchir sans gêne est de $0^m,25$.

Le soldat chargé de 15 à 20 kilogrammes, sur un beau chemin en pays de plaine, peut parcourir 49 kilomètres en 10 heures de marche par jour. La marche ordinaire de nos armées varie de 28 à 36 kilomètres par jour; pendant les guerres du premier Empire français, ce parcours a atteint quelquefois 48 et même 60 kilomètres.

Un colporteur chargé de 44 kilogrammes parcourt 20 kilomètres par jour.

Les portefaix de Rive-de-Gier qui chargent les bateaux portent un hectolitre de houille de 85 kilogrammes à 36 mètres, et font de 290 à 300 voyages par jour.

D'après Coulomb, un homme qui porte des fardeaux à une assez grande distance et revient à vide, peut porter environ 61 kilogrammes, et parcourir dans sa journée 11 kilomètres avec cette charge, et par conséquent la même distance à vide.

Sur un sol horizontal, un homme transporte, dans sa journée de 10 heures, en 500 brouettées de 60 kilogrammes, 20 mètres cubes de terre à 30 mètres.

D'après Coulomb, le travail utile maximum d'un homme qui monte en portant une charge de 65 à 70 kilogrammes n'est que le 1/4 du travail qu'il peut produire lorsqu'il monte libre et sans charge.

Dans des terrassements exécutés au fort de Vincennes, où l'homme élevait les matériaux par le poids de son corps, chaque manœuvre élevait dans sa journée 310 fois le poids de son corps à 13 mètres de hauteur.

Le poids des chevaux varie de 300 à 700 kilogrammes; il existe même des petits chevaux, appelés *poneys*, dont le poids est à peine de 200 kilogrammes. Celui des chevaux de malles-postes ou de diligences est ordinairement de 450 kilogrammes.

Le plus grand effort des chevaux de trait varie de 300 à 500 kilogrammes.

La plus grande vitesse que puisse prendre un cheval dans une course d'un quart d'heure ne dépasse pas 14 à 15 mètres (courses du Champ de Mars); la vitesse du cheval au galop est de 10 mètres; au trot, elle est de $3^m,50$ à 4 mètres; au grand pas de 2 mètres, et au petit pas, de 1 mètre.

Les chevaux de malles-postes traînent 500 kilogrammes à la vitesse de $4^m,44$, et parcourent 20 kilomètres par jour; ceux des diligences, 800 kilogrammes à la vitesse de $3^m,33$, et parcourent 24 kilomètres; ceux des chasse-marées, 560 kilogrammes à la vitesse de $2^m,20$, et parcourent 32 kilomètres.

Sur le dos, la charge du cheval est moyennement de 100 à 175 kilogrammes; les pelletiers anglais la portent quelquefois à 200 ou 250 kilogrammes à une faible vitesse.

Un cheval portant son cavalier du poids de 80 kilogrammes, et marchant pendant 7 heures, parcourt 40 kilomètres, ce qui donne une vitesse de $1^m,59$.

40. Le tableau suivant, qui donne le rapport de l'effort de tirage à la charge traînée, voiture comprise, sur les différentes espèces de chemins, permet de comparer l'*effet utile* produit par les moteurs animés, dans le transport horizontal des fardeaux sur ces chemins, au travail dépensé par ces moteurs. Ce tableau est le résultat des expériences de Boulard, Rumfort, Régnier et de quelques autres observateurs.

NATURE DE LA VOIE SUPPOSÉE HORIZONTALE.	RAPPORT du tirage à la charge totale
Terrain naturel, non battu et argileux, mais sec.	0,250
Id. *id.* siliceux et crayeux.	0,165
Terrain ferme, battu et très uni	0,040
Chaussée en sable ou cailloutis nouvellement placés	0,125
Id. en empierrement, à l'état d'entretien ordinaire.	0,080
Id. *id* parfaitement entretenue et roulante	0,033
Id. pavée à la manière ordinaire, et la voiture étant suspendue. — au pas.	0,030
Id. pavée à la manière ordinaire, et la voiture étant suspendue. — au grand trot	0,070
Id. pavée en carreaux de grès bien entretenus — au pas.	0,025
Id. pavée en carreaux de grès bien entretenus — au grand trot	0,060
Id. en madriers de chêne non rabotés.	0,022
Chemins à ornières plates, en fonte de fer, ou en dalles très dures et très unies.	0,010
Chemins de fer à ornières saillantes, en bon état d'entretien.	0,007
Id. *id.* parfaitement entretenues, et les essieux continuellement huilés.	0,005

Le poids de la voiture varie ordinairement entre 1/3 et 1/4 de la charge totale.

Nota. Le rapport du tirage à la charge traînée augmente rapidement avec la pente des chemins.

Cette pente, si faible qu'elle soit, a une influence sensible. On s'en rendrait compte facilement par la théorie du plan incliné (voir n° 78). Aussi, sur les lignes ferrées pour chemin de fer, les pentes sont-elles très limitées. Des inclinaisons de $0^m,01$ et $0^m,02$ par mètre sont déjà considérées comme de très grandes inclinaisons. Elles exigent des locomotives puissantes, et des pentes supérieures à $0^m,025$ exigent des machines spéciales.

41. *Tableau des rapports de la force de tirage à la charge*

DÉSIGNATION DE LA ROUTE PARCOURUE PAR LA VOITURE.		VALEURS de	AFFUTS et charrettes d'artillerie.
		l =	0m,10 à 0m,12
		r =	0m,038
		r' =	0m,782
		r'' =	0m,782
		fr =	0,00247
Accotement en terre en très bon état, à peu près sec			0,029
Accotement solide recouvert d'une couche de gravier de 0m,03 à 0m,04 d'épaisseur.			0,073
Accotement solide recouvert d'une couche de gravier de 0m,05 à 0m,06 d'épaisseur.			0,086
Sol en terre ferme recouvert de 0m,10 à 0m,15 de gravier, ou route neuve			0,092
Accotement ou route couverte de neige non frayée			0,054
Sol en terre ferme, recouvert d'une couche de sable fin mêlé de gravier de 0m,10 à 0m,15 d'épaisseur			0,098
Route en empierrement.	en très bon état, très sèche et très unie		p. 0,016 t. 0,020
	un peu humide ou couverte de poussière, avec quelques cailloux à fleur du sol		0,022
	très solide, avec gros cailloux à fleur du sol		0,018
	solide, avec frayé léger et boue molle		0,029
	solide, avec ornières et boue		0,035
	avec détritus et boue épaisse		0,041
	très dégradée, ornières profondes de 0m,06 à 0m,08, boue épaisse.		0,054
	très mauvaise, ornières profondes de 0m,10 à 0m,12, boue épaisse, fond dur et inégal		0,061
Pavés en grès de Sierck serré			0,012
Pavé en grès de Fontainebleau.	ordinaire sec		0,013
	en état ordinaire, mouillé et couvert de boue		0,017
Tablier de pont en madriers			0,018

l largeur de la jante;
r rayon des essieux;
r' rayon des petites roues;
r'' rayon des grandes roues;
f coefficient de frottement de l'essieu;

totale traînée, d'après les expériences du général Morin.

CHARIOTS d'artillerie.	CHARIOTS comtois.	VOITURES DE ROULAGE.		CHARRETTES.		DILIGENCES des grandes messageries.	VOITURES à bancs suspendus.
$0^m,070$ à $0^m,075$ $0^m,038$ $0^m,575$ $0^m,780$ 0,00247	$0^m,06$ à $0^m,07$ $0^m,027$ $0^m,625$ $0^m,725$ 0,00175	$0^m,10$ à $0^m,12$ $0^m,032$ $0^m,450$ $0^m,750$ 0,00208	$0^m,10$ à $0^m,12$ $0^m,032$ $0^m,55$ $0^m,85$ 0,00208	$0^m,10$ à $0^m,12$ $0^m,032$ $0^m,80$ 0,00208	$0^m,10$ à $0^m,12$ $0^m,032$ $1^m,00$ 0,00208	$0^m,10$ à $0^m,12$ $0^m,032$ $r' + r'' =$ $1^m,15$ 0,00208	$0^m,07$ à $0^m,08$ $0^m,027$ $0^m,45$ $0^m,70$ 0,00175
0,033	0,032	0,037	0,031	0,028	0,022	*p. t.* 0,038	*p. t.* 0,038
0,085	0,084	0,095	0,081	0,071	0,057	*p. t.* 0,099	*p. t.* 0,099
0,099	0,099	0,112	0,096	0,084	0,067	*p. t.* 0,116	*p. t.* 0,116
0,107	0,106	0,120	0,103	0,090	0,071	*p. t.* 0,125	*p. t.* 0,125
0,062	0,061	0,070	0,060	0,053	0,042	0,073	»
0,123	0,112	0,127	0,109	0,095	0,076	*p. t.* 0,133	*p. t.* 0,145
0,018	0,017	0,020	0,017	0,015	0,012	*p.* 0,021 *t.* 0,024 *g. t.* 0,025	*p.* 0,020 *t.* 0,024 *g. t.* 0,025
0,026	0,024	0,028	0,024	0,021	0,017	*p.* 0,030 *t.* 0,037 *g. t.* 0,041	*p.* 0,029 *t.* 0,037 *g. t.* 0,041
0,021	0,020	0,023	0,020	0,018	0,014	*p.* 0,025 *t.* 0,038 *g. t.* 0,044	*p.* 0,024 *t.* 0,037 *g. t.* 0,044
0,033	0,032	0,037	0,031	0,028	0,022	*p.* 0,038 *t.* 0,046 *g. t.* 0,050	*p.* 0,038 *t.* 0,045 *g. t.* 0,049
0,041	0,040	0,045	0,039	0,034	0,027	*p.* 0,048 *t.* 0,054 *g. t.* 0,058	*p.* 0,047 *t.* 0,054 *g. t.* 0,058
0,048	0,047	0,053	0,046	0,040	0,032	*p.* 0,056 *t.* 0,063 *g. t.* 0,067	*p.* 0,055 *t.* 0,063 *g. t.* 0,067
0,063	0,063	0,070	0,060	0,053	0,042	*p.* 0,073 *t.* 0,081 *g. t.* 0,085	*p.* 0,072 *t.* 0,080 *g. t.* 0,084
0,070	0,069	0,079	0,067	0,059	0,047	*p.* 0,082 *t.* 0,093	*p.* 0,081 *t.* 0,100
0,014	0,013	0,016	0,013	0,012	0,009	*p.* 0,016 *t.* 0,024 *g. t.* 0,028	*p.* 0,016 *t.* 0,024 *g. t.* 0,027
0,015	0,014	0,017	0,014	0,012	0,010	*p.* 0,017 *t.* 0,026 *g. t.* 0,031	*p.* 0,017 *t.* 0,026 *g. t.* 0,030
0,020	0,019	0,022	0,019	0,016	0,013	*p.* 0,023 *t.* 0,030 *g. t.* 0,034	*p.* 0,022 *t.* 0,030 *g. t.* 0,033
0,021	0,020	0,023	0,020	0,014	0,014	*p. t.* 0,024	*p. t.* 0,024

fr moment du frottement de l'essieu;
p. signifie au pas;
t. *id.* au trot;
p. t. *id.* au pas et au trot;
g. t. *id.* au grand trot.

42. *Tableau des efforts qu'un manœuvre de force ordinaire peut exercer pendant un court intervalle de temps, en agissant sur différents outils.*

DÉSIGNATION DES INSTRUMENTS.	EFFORT en kilogrammes.
Une plane	45
Une tarière avec les deux mains	45
Une clef d'écrou	38
Un étau ordinaire en agissant sur la clef	33
Un ciseau ou un foret dans le sens vertical	33
Une manivelle	30
Une tenaille ou une pince, en agissant par compression	27
Un rabot à main	23
Un étau à main	20
Une scie à main	16
Un vilebrequin	7
Un petit tournevis, ou en tournant avec le pouce et les doigts	6

MACHINES EN GÉNÉRAL

43. Une *machine* est un système matériel composé de différents organes tellement reliés entre eux, que tout mouvement de l'un, compatible avec la solidité du système, entraîne des mouvements relatifs déterminés pour chacun des autres. Son but est de transmettre le travail des forces.

Les mouvements relatifs des différents organes d'une machine ne sont pas seulement déterminés en direction, mais aussi en intensité. Généralement, les mouvements sont périodiques, uniformes (8), et la vitesse est mise en harmonie avec les exigences des travaux industriels à produire, sans que jamais elle atteigne la limite à laquelle la solidité de la machine serait compromise.

44. Dans une machine en mouvement agissent différentes forces que l'on peut diviser en trois classes :

1° *Les forces mouvantes ou motrices.* Ce sont les forces qui agissent dans le sens du mouvement des organes qu'elles sollicitent; c'est par conséquent à elles qu'est dû le mouvement de la machine;

2° *Les résistances utiles,* qui sont les forces que les matières sur lesquelles opère la machine opposent au mouvement des organes qui les sollicitent;

3° *Les résistances passives ou nuisibles,* ou les forces qui naissent du mouvement des différents organes de la machine pour s'opposer à ce mouvement; elles sont dues au frottement de ces organes entre eux ou sur des corps étrangers, aux chocs qui peuvent avoir lieu entre ces organes par suite de changements brusques de vitesse ou de direction, à la raideur des cordes ou courroies, etc.

45. Considérant les forces motrices comme positives, puisqu'elles

agissent dans le sens du mouvement, les résistances utiles et les résistances nuisibles sont négatives. Par conséquent, si l'on suppose le système animé d'un mouvement uniforme, la somme des travaux de toutes les forces pour un temps quelconque sera nulle, puisque le gain ou la perte de puissance vive est nul, et l'on aura (30 et *Int.* 1637) :

$$\mathcal{T}_m - \mathcal{T}_u - \mathcal{T}_n = 0 \quad \text{ou} \quad \mathcal{T}_m = \mathcal{T}_u + \mathcal{T}_n.$$

Ce qui fait voir que, *le mouvement étant uniforme, le travail moteur* $\mathcal{T}_m$, *dû aux forces motrices, est égal au travail utile* $\mathcal{T}_u$, *dû aux résistances utiles, plus le travail nuisible* $\mathcal{T}_n$, *dû aux résistances passives.*

Réciproquement, si, à chaque instant, cette équation est vérifiée, le mouvement est uniforme; car la vitesse ne peut varier qu'autant que la somme des travaux de toutes les forces n'est pas nulle.

Lorsque pour une machine cette relation est vérifiée, on dit qu'il y a équilibre dynamique.

Quand le mouvement d'une machine est périodique uniforme (8), le gain ou la perte de puissance vive n'est nul que pour la durée d'un nombre entier de périodes; pour ce temps, on a encore :

$$\mathcal{T}_m = \mathcal{T}_u + \mathcal{T}_n.$$

On dit alors que la machine est en *équilibre dynamique périodique :* c'est l'état ordinaire des machines, non seulement à cause de la forme de leurs organes, mais aussi à cause des variations plus ou moins grandes des forces motrices et surtout des résistances.

46. Impossibilité du mouvement perpétuel. Dans le cas où l'on néglige les résistances passives, la formule précédente devient :

$$\mathcal{T}_m = \mathcal{T}_u.$$

Ce qui exprime que *le travail utile* $\mathcal{T}_u$ *est égal au travail moteur* $\mathcal{T}_m$.

Il est impossible de réaliser ce résultat dans la pratique; car, dans une machine quelconque, il y a toujours des résistances passives qui diminuent le travail utile.

Le travail nuisible, inévitable, des résistances passives fait voir l'impossibilité d'obtenir le mouvement perpétuel. On ne saurait trop insister sur cette vérité pour éviter des déceptions à ceux qui croient ce mouvement réalisable.

Il est évident que s'il n'y avait pas de résistances passives, c'est-à-dire si l'on avait $\mathcal{T}_m = \mathcal{T}_u$, on pourrait obtenir le mouvement perpétuel ; puisque, par exemple, à l'aide d'une quantité d'eau tombant d'une certaine hauteur, on pourrait en élever une même quantité à la même hauteur; celle-ci pourrait ensuite faire monter la première à la même hauteur, puis la première élever la seconde, et ainsi de suite indéfiniment. Un pendule écarté de la verticale oscillerait indéfiniment sans la résistance de l'air et le frottement de son axe de suspension.

47. Calcul de la puissance et de la résistance d'une machine. P étant la force motrice agissant sur une machine quelconque, et Q la résistance

utile vaincue par cette machine, E et e étant les espaces parcourus par les points d'application de P et Q dans les directions de ces forces et dans un même temps quelconque, au commencement et à la fin duquel la vitesse de la machine est la même, l'équation d'équilibre dynamique donne, en supposant nulles les résistances passives :

$$PE = Qe \quad \text{ou} \quad P : Q = e : E.$$

De l'égalité entre le travail de la puissance et celui de la résistance, il résulte que pour un même travail moteur $P \times E$, selon que la force Q sera multipliée par $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{2}$ 2, 3..., l'espace e sera respectivement divisé par les mêmes nombres; d'où découle la maxime bien connue : *Ce qu'on gagne en force, on le perd en espace, ou,* ce qui revient au même, *en vitesse.*

La proportion précédente permet de calculer l'une quelconque des quatre quantités P, Q, E, e, quand on connaît les trois autres.

Pour une machine quelconque, s'il s'agit de calculer la résistance Q que pourra vaincre une puissance P, on détermine les espaces E et e parcourus dans le même temps par les points d'application des forces P et Q. E et e sont quelconques si ces points d'application ont des mouvements uniformes; mais on les prend correspondant à une période ou à un nombre entier de périodes si le mouvement de la machine est périodique. Lorsque la machine est construite, c'est en la mettant en mouvement qu'on détermine les valeurs de E et e. Lorsqu'elle est seulement projetée, on déduit d'une valeur de E celle de e d'après les rapports des espaces parcourus par les différents organes qui transmettent le mouvement du point d'application de P à celui de Q.

Supposons que la résistance à vaincre $Q = 100^k$, et qu'il s'agisse de déterminer quelle sera la puissance P en négligeant les résistances passives.

On détermine les valeurs correspondantes de E et e en opérant comme il vient d'être indiqué, soient $E = 2^m,5$ et $e = 0^m,80$; puis on remplace les lettres par leurs valeurs dans la proportion précédente, ce qui donne :

$$P : 100^k = 0,80 : 2,5, \qquad \text{d'où} \qquad P = \frac{100 \times 0,80}{2,5} = 32^k.$$

Si l'on avait donné la puissance P, on aurait déterminé Q en opérant comme pour P.

Pour calculer la force théorique en chevaux-vapeur (36), on détermine le temps pendant lequel les espaces E et e sont parcourus quand la machine est en marche normale, et les produits égaux $P \times E$ et $Q \times e$ donnent chacun le nombre de kilogrammètres produit par P ou absorbé par Q dans ce temps. Divisant ce nombre de kilogrammètres par ce temps exprimé en secondes, on obtient la puissance de la machine en kilogrammètres par seconde. Ce nombre de kilogrammètres divisé par 75 donne la puissance de la machine en chevaux. Si, dans l'exemple précédent, E et e sont parcourus en $1'',5$, $PE = 32 \times 2,5 = Qe = 100$

$\times 0,80 = 80^{km}$ est le nombre de kilogrammètres produit et absorbé en $1'',5$; $\frac{80}{1,5} = 53^{km},33$ est la puissance de la machine en kilogrammètres par seconde, et $\frac{53,33}{75} = 0,71$ est sa puissance en chevaux-vapeur.

48. Souvent, dans la pratique, on connaît la puissance dont on peut disposer en chevaux; supposons qu'elle soit de 25 chevaux. Pour calculer P et Q, on commence par déterminer $E = 3^m$ et $e = 0^m,8$ par l'expérience. La durée de ces parcours étant $1'',4$, le travail produit par la machine dans ce temps est de $75 \times 25 \times 1,4 = 2625^{km}$; on a donc :

$$PE = P \times 3 = 2625, \quad \text{d'où} \quad P = \frac{2625}{3} = 875^k.$$

Ayant P, on peut calculer Q à l'aide de la proportion du n° 47. Du reste, on a encore :

$$Qe = Q \times 0,8 = 2625, \quad \text{d'où} \quad Q = \frac{2625}{0,8} = 3281^k,25.$$

49. Il peut arriver qu'au lieu d'avoir une seule force motrice, on en ait plusieurs P, P′, P″... et qu'on ait aussi plusieurs résistances utiles Q, Q′, Q″... Déterminant, comme pour deux forces, les espaces E, E′ E″... et e, e', e''... parcourus dans le même temps par les points d'application des forces dans la direction de ces forces, l'équation

$$\mathcal{T}_m = \mathcal{T}_u, \qquad (46)$$

au lieu de fournir l'équation du n° 47, donne :

$$PE + P'E' + P''E'' + ... = Qe + Q'e' + Q''e'' + ...$$

équation à l'aide de laquelle on déterminera l'une quelconque des quantités qui y entrent connaissant toutes les autres. Les deux membres de cette équation donnent chacun le travail théorique produit ou absorbé pendant la durée du parcours des espaces correspondants E, E′... e, e'... Connaissant cette durée, on déterminera en kilogrammètres le travail théorique produit ou absorbé pendant une seconde, et ce dernier travail divisé par 75 donnera la puissance en chevaux-vapeur (36). Si l'on avait d'abord donné la puissance en chevaux, par des calculs inverses à ceux que nous venons d'indiquer, le problème aurait fourni, soit pour P, P′... E, E′ ..., soit pour Q, Q′ ... e, e' ..., une infinité de valeurs satisfaisant à l'équation; mais les valeurs choisies auraient toujours dû donner, pour le premier et pour le deuxième membre de l'équation, une valeur correspondant à 25 chevaux ou à $25 \times 75 = 1875^{km}$ par seconde.

50. Dans les machines, surtout dans les machines industrielles, les résistances passives sont assez considérables pour qu'on ne puisse pas négliger le travail qu'elles absorbent; l'équilibre dynamique est alors exprimé par :

$$\mathcal{T}_m = \mathcal{T}_u + \mathcal{T}_n.$$

Pour un certain déplacement de la machine, les travaux $\mathcal{T}_m$, $\mathcal{T}_u$ et $\mathcal{T}_n$ s'évaluent comme dans le cas précédent; ainsi, P étant la puissance, Q la résistance utile, R, R'... les différentes résistances passives et E, e, i, i' ... les espaces correspondants parcourus dans le même temps par les points d'application dans la direction de ces forces, on a :

$$PE = Qe + Ri + R'i' + \ldots$$

équation qui revient à celle du n° 49, dans laquelle on aurait remplacé différentes résistances utiles par des résistances nuisibles.

Il peut arriver qu'une ou plusieurs résistances nuisibles proviennent de chocs entre les organes de la machine. Le travail absorbé par ces résistances n'est plus évalué au moyen du produit d'une force par l'espace que parcourt son point d'application, mais par la perte de puissance vive due au choc, et cette perte, évaluée en kilogrammètres (95), entre dans le second membre de l'équation comme tous les autres travaux nuisibles Ri, $R'i'$ ...

A l'aide de l'équation précédente, connaissant, dans une machine, deux des trois travaux suivants : le travail moteur $\mathcal{T}_m = PE$, le travail utile $\mathcal{T}_u = Qe$, et le travail nuisible $\mathcal{T}_n = Ri + R'i' + \ldots$, on détermine le troisième.

51. On se propose ordinairement d'établir une machine capable de produire un travail utile $\mathcal{T}_u = Qe$ donné. Il faut alors déterminer $\mathcal{T}_m = PE$ capable de produire non seulement ce travail utile, mais aussi le travail nuisible. On doit donc commencer par calculer ce travail nuisible; ce que l'on fait en déterminant les valeurs des différentes résistances nuisibles R, R' ... en fonction de Q, et par suite $\mathcal{T}_n$ en fonction de $\mathcal{T}_u$.

Ayant $\mathcal{T}_u$ et $\mathcal{T}_n$, l'équation du n° 50 donne $\mathcal{T}_m$, et l'on peut déterminer le travail moteur en chevaux comme au n° 49.

52. Le travail moteur $\mathcal{T}_m$ étant représenté par 100, et les travaux utile $\mathcal{T}_u$ et nuisible $\mathcal{T}_n$ étant par exemple 75 et 25, on dit que le *rendement* de la machine est de 75 p. 100; la *perte* est alors de 25 p. 100. S'il était possible que la perte fût nulle, le rendement serait de 100 p. 100

53. *Remarque.* Ce qui vient d'être exposé fait voir l'importance que joue la formule de l'*équilibre* dynamique dans l'établissement des machines. Que de ruines et de procès souvent désasteux sont dus à ce que cette formule n'ayant pas été bien comprise, des machines établies n'ont pas produit le travail qu'on en attendait!

Au point où l'on en est aujourd'hui, la pratique a prononcé sur la quantité de travail nuisible $\mathcal{T}_n$ qui a lieu dans les différentes machines industrielles, et l'on se base généralement sur ces résultats dans les constructions nouvelles, tout en cherchant à diminuer cette perte autant que possible.

Il y a cependant des cas où il peut être nécessaire de se rendre compte de cette perte; c'est pourquoi nous allons étudier les différentes résistances passives, et établir ensuite les équations d'équilibre dynamique des machines simples; équations desquelles on pourra passer à

celles des machines les plus compliquées, qui ne sont en général que la réunion d'un certain nombre de ces machines simples.

FROTTEMENT

54. La surface d'un corps n'étant jamais parfaitement unie, quel que soit son poli, il en résulte que quand on met deux surfaces en contact, elles se pénètrent toujours plus ou moins. Cet enchevêtrement n'est pas seulement dû à l'imperfection du poli des pièces, mais aussi à ce que les surfaces en contact se pressant mutuellement, il y a une déformation d'autant plus grande que les corps sont moins durs et que la pression de l'un sur l'autre est plus considérable.

De l'enchevêtrement des molécules de deux surfaces en contact, il résulte que si l'on imprime un mouvement à l'un des corps, mais de manière à le laisser toujours en contact avec la surface de l'autre corps, il naît une résistance qui s'oppose directement au mouvement, et à laquelle on donne le nom de *frottement*.

Si la même partie de la surface d'au moins un des corps reste toujours en contact, c'est-à-dire s'il y a glissement d'un ou de chacun des corps sur l'autre, le frottement prend le nom de *frottement de glissement*. Si, au contraire, les parties des surfaces en contact varient à chaque instant, comme dans le mouvement d'une bille sur un tapis de billard, ou d'une roue de voiture sur une route, le frottement prend le nom de *frottement de roulement*.

55. Jusqu'à ces derniers temps, on a admis, d'après l'expérience, que le frottement était proportionnel à la pression normale que les surfaces exerçaient l'une sur l'autre, qu'il variait selon la nature et l'état des surfaces en contact, et qu'il était indépendant de la vitesse et de l'étendue de ces surfaces.

Des expériences faites en 1851, par M. Jules Poirée, sur le chemin de fer de Lyon, ont fait voir que pour des vitesses supérieures à 4 ou 5 mètres par seconde, le frottement diminue à mesure que la vitesse augmente. Dans ces expériences, on a serré les freins d'un wagon de manière à empêcher les roues de tourner, et on l'a fait mouvoir sur les rails comme un traîneau; la vitesse a été portée jusqu'à 22 mètres par seconde, et à l'aide d'un dynamomètre, on a constaté que le frottement de glissement des roues sur les rails diminuait à mesure que la vitesse devenait plus grande. (Voir la *Quatrième partie.*)

M. Bochet, ingénieur des mines, des résultats fournis par les expériences de M. Poirée, et par celles qu'il a exécutées lui-même sur le Chemin de fer de l'Ouest, d'abord en 1856, puis en 1860, conclut, dans un mémoire publié en 1861 dans les *Annales des mines :*

1° Que la diminution du frottement à mesure que la vitesse augmente est un phénomène général pour des vitesses de 0 à 25 mètres par seconde;

2° Que le frottement cesse d'être proportionnel à la pression, et par suite n'est plus indépendant de l'étendue des surfaces frottantes, quand la pression cesse d'être petite ;

3° Qu'il n'y a pas, en général, de frottement spécial au départ. Pour les bois et les cuirs sur rails secs, la gutta-percha sur rails secs et mouillés, le fer sur rails secs, mouillés ou gras, le frottement au départ a été exactement le même qu'à une vitesse extrêmement petite, et par suite plus grand qu'à la vitesse normale ; au contraire, pour le bois et le cuir sur rails mouillés ou gras, le frottement au départ a été, en général et en moyenne, double de celui correspondant à une vitesse extrêmement petite.

Pour déterminer le frottement des roues calées, M. Bochet a employé un wagon ordinaire à frein, dont le poids a varié de 6 à 10 tonnes. Pour le frottement des diverses matières, il a fait usage d'un wagon, de l'invention de M. Didier, portant, solidement fixées à son châssis, de fortes armures auxquelles étaient adaptés des patins d'une grande longueur glissant sur les rails par des semelles faites de la matière à essayer. La pression des patins sur les rails a varié de 2 à 15 kilog. par centimètre carré.

M. Bochet a représenté ses résultats par des courbes, et il les a même réunies par une formule que nous donnons dans la *Quatrième partie*. Cette formule contient deux et même trois coefficients suffisamment déterminés pour le cas des corps essayés glissant sur des rails, mais qui n'embrassent pas la généralité des corps employés et des circonstances qui se présentent dans la pratique. Comme de plus, dans les cas habituels, dans les machines par exemple, la vitesse est faible, bien inférieure à 4 mètres par secondes, et qu'alors la formule usitée, qui est très simple (56), donne des résultats suffisamment exacts, jusqu'à de nouvelles et plus complètes expériences, nous contiuerons de l'adopter.

En lubrifiant les surfaces en contact avec des corps onctueux, tels que l'huile, la graisse, le savon..., on diminue considérablement le frottement, et d'autant plus que l'enduit est renouvelé avec plus de continuité. L'eau pure est un mauvais enduit, surtout pour les métaux ; souvent même elle augmente le frottement.

Nous venons de dire que le frottement est proportionnel à la pression des surfaces entre elles ; mais cela n'a lieu que jusqu'à une certaine limite ; au delà, les surfaces grippent, c'est-à-dire s'entament en s'échauffant, et le frottement devient considérable sans varier suivant aucune loi. Les corps onctueux, tout en diminuant le frottement, reculent considérablement la limite à laquelle les surfaces commencent à gripper.

D'après des expériences déjà anciennes de Wood, la pression des essieux de wagons dans leurs boîtes ne devrait pas dépasser $6^k,33$ par centimètre carré de surface de contact ; au-dessus de cette limite, la graisse qui lubrifie les surfaces serait écrasée et chassée ; alors les corps frottant à sec s'entameraient, et le frottement deviendrait considérable.

Aujourd'hui que le graissage se fait régulièrement, la pression peut

atteindre 25 et jusqu'à 30 kilogrammes par centimètre carré. (Voir l'article *Tourillons*.)

L'expérience prouve aussi que quand deux surfaces ont été en contact et en repos relatif pendant un certain temps, le frottement de glissement est plus considérable au premier instant du mouvement que quand le mouvement a lieu. Cela est d'autant plus sensible que la pression est plus grande, et que les corps sont plus compressibles, ces deux circonstances tendant à faire pénétrer les surfaces et à chasser l'enduit.

56. Le rapport entre le frottement F, c'est-à-dire la résistance qui s'oppose directement au mouvement, et la pression P qui s'exerce normalement entre les deux surfaces en contact, est ce qu'on appelle le *coefficient de frottement*; ainsi, désignant ce coefficient par f, on a :

$$f = \frac{F}{P}, \quad \text{d'où} \quad F = fP \quad \text{et} \quad P = \frac{F}{f}.$$

Pour $P = 500^k$ et $f = 0,08$, on a : $F = 0,08 \times 500 = 40$ kil.

Ces formules s'appliquent au premier instant du mouvement, après quelque temps de repos, comme pendant le mouvement; seulement F et f ont d'autres valeurs (57 et 59).

L'expérience prouvant qu'un léger choc, donné sur les corps en contact depuis un certain temps, produit un ébranlement suffisant pour faire commencer le mouvement quand le corps mobile est sollicité par un effort très peu supérieur à celui qui est capable de continuer le mouvement, dans les applications, pour évaluer le travail absorbé par le frottement, on ne tient compte que du frottement qui s'exerce quand les corps sont déjà en mouvement. On ne tient compte que de ce dernier frottement dans l'évaluation de la stabilité d'une construction soumise à des ébranlements.

Le frottement de roulement, sur lequel nous reviendrons au sujet des chemins de fer, peut être négligé, comparativement au frottement de glissement, quand il s'exerce entre quelques organes d'une machine industrielle (*Int.* 1649 et suivants).

57. *Tableau des valeurs du coefficient de frottement des surfaces planes* (56), *d'après les expériences du général Morin.*

INDICATION DES SURFACES FROTTANTES.	DISPOSITION des fibres.	ÉTAT des surfaces.	RAPPORT du frottement à la pression	
			au départ, après quelque temps de contact.	pendant le mouvement.
Chêne sur chêne.	Parallèles.	Sans enduit.	0,62	0,48
Id. *id.*	*Id.*	Frottées de savon sec.	0,44	0,16
Id. *id.*	Perpendiculaires. .	Sans enduit.	0,54	0,34
Id. *id.*	*Id.* . .	Mouillées d'eau. . . .	0,71	0,25
Id. *id.*	Bout sur plat. . . .	Sans enduit.	0,43	0,19
Chêne sur orme.	Parallèles.	*Id.*	0,38	»
Orme sur chêne	*Id.*	*Id.*	0,69	0,43
Id. *id.*	*Id.*	Frottées de savon sec.	0,41	0,25
Id. *id.*	Perpendiculaires. .	Sans enduit.	0,57	0,45
Frêne, sapin, hêtre, sorbier sur chêne.	Parallèles.	*Id.*	0,53	0,36 à 0,40
Fer sur chêne.	*Id.*	*Id.*	0,62	0,62
Id. *id.*	*Id.*	Mouillées d'eau. . . .	0,65	0,26
Id. *id.*	*Id.*	Frottées de savon sec.	»	0,21
Fonte sur chêne.	*Id.*	Sans enduit	»	0,49
Id. *id.*	*Id.*	Mouillées d'eau. . . .	0,65	0,22
Id. *id.*	*Id.*	Frottées de savon sec.	»	0,19
Cuivre jaune sur chêne.	*Id.*	Sans enduit.	0,62	0,62
Fer sur orme.	*Id.*	*Id.*	»	0,25
Fonte sur orme.	*Id.*	*Id.*	»	0,20
Cuir tanné sur chêne	Cuir à plat.	*Id.*	0,61	0,30 à 0,35
Id. *id.*	Cuir de champ. . .	*Id.*	0,43	0,30 à 0,35
Id. *id.*	*Id.* . . .	Mouillées d'eau. . . .	0,79	0,29
Id. *id.*	Cuir à plat.	*Id.* . . .	»	0,29
Cuir noir corroyé ou courroie. . . . { sur une surface plane en chêne.	Parallèles.	Sans enduit.	0,74	0,27
Cuir noir corroyé ou courroie. . . . { sur tambour en chêne.	Perpendiculaires. .	*Id.*	0,47	»
Cuir tanné sur fonte et sur bronze. . .	A plat ou de champ.	*Id.*	»	0,56
Id. *id.* *id.* . . .	*Id.*	Mouillées d'eau. . . .	»	0,36
Id. *id.* *id.* . . .	*Id.*	Onctueuses et eau. .	»	0,23
Id. *id.* *id.* . . .	*Id.*	Huilées.	»	0,15
Cuir de bœuf pour garniture de piston, sur fonte.	*Id.*	Mouillées d'eau. . . .	0,62	»
Id. *id.* *id.*	*Id.*	Huile, suif, saindoux.	0,12	»
Cuir noir corroyé sur poulie en fonte.	Cuir à plat.	Sans enduit.	0,28	»
Id. *id.* *id.*	*Id.*	Mouillées d'eau. . . .	0,38	»
Chanvre en brin ou en corde sur chêne.	Parallèles.	Sans enduit.	»	0,52
Id *id.* *id.*	Perpendiculaires. .	Mouillées d'eau. . . .	»	0,33
Natte de chanvre sur chêne.	Parallèles.	Sans enduit.	0,50	»
Id. *id.*	*Id.*	Mouillées d'eau. . . .	0,87	»
Chêne et orme sur fonte.	*Id.*	Sans enduit.	»	0,38
Poirier sauvage sur fonte.	*Id.*	*Id.*	»	0,44
Fer sur fer.	»	*Id.*	»	» (1)
Fer sur fonte.	»	*Id.*	0,19	0,18 (2)
Fer sur bronze.	»	*Id.*	»	0,18 (2)
Fonte sur fonte.	»	*Id.*	0,16 (a)	0,15 (2)
Fonte sur bronze.	»	*Id.*	»	0,15 (2)
Bronze sur bronze.	»	*Id.*	»	0,20
Id. sur fonte.	»	*Id.*	»	0,22
Id. sur fer.	»	*Id.*	»	0,16 (3)

(*a*) Les surfaces conservant quelque onctuosité;
(1) Les surfaces se rodant dès qu'il n'y a pas d'enduit;
(2) Les surfaces conservant encore un peu d'onctuosité;
(3) Les surfaces étant un peu onctueuses;

INDICATION DES SURFACES FROTTANTES.	DISPOSITION des fibres.	ÉTAT des surfaces.	RAPPORT du frottement à la pression au départ, après quelque temps de contact.	RAPPORT du frottement à la pression pendant le mouvement.
Chêne, orme, poirier sauvage, fonte, fer, acier et bronze, glissant l'un sur l'autre ou sur eux-mêmes.	»	Lubrifiées à la manière ordinaire, de suif, d'huile, de saindoux ou de cambouis mou. . .	»	0,07 à 0,08 (a)
Les mêmes, *id.* *id.*	»	Légèrement onctueuses au toucher. . .	»	0,15
Chêne, orme, charme, fer, fonte et bronze, glissant deux à deux l'un sur l'autre	»	Enduites de suif. . .	0,10 (b)	»
Les mêmes, *id.* *id.*	»	Enduites d'huile ou de saindoux. . . .	0,15 (c)	»
Calcaire tendre, dit calcaire oolithique bien dressé sur lui-même	»	Sans enduit.	0,74	0,64
Calcaire dur, dit muschelkalk, bien dressé sur calcaire oolithique	»	*Id.*	0,75	0,67
Brique ordinaire sur calcaire oolithique	»	*Id.*	0,67	0,65
Chêne sur calcaire oolithique.	Bois debout	*Id.*	0,63	0,38
Fer forgé, *id.*	Parallèles.	*Id.*	0,49	0,69
Muschelkalk sur muschelkalk	»	*Id.*	0,70	0,38
Calcaire oolithique sur muschelkalk. .	»	*Id.*	0,75	0,65
Brique ordinaire sur muschelkalk. . .	»	*Id.*	0,67	0,60
Chêne sur muschelkalk.	Bois debout	*Id.*	0,64	0,38
Fer forgé sur muschelkalk.	Parallèles.	*Id.*	0,42	0,24
Id. *id.*	*Id.*	Mouillées d'eau. . .	»	0,30
Calcaire oolithique sur calcaire oolithique	»	Mortier de trois parties de sable fin et une partie de chaux hydraulique. . . .	0,74 (d)	»

(a) Lorsque l'enduit est sans cesse renouvelé et uniformément réparti, ce rapport peut s'abaisser jusqu'à 0,05;
(b) Lorsque le contact n'a pas duré assez longtemps pour exprimer l'enduit;
(c) Lorsque le contact a duré assez longtemps pour exprimer l'enduit, et ramener les surfaces à l'état onctueux;
(d) Après un contact de 10 à 15 minutes.

58. Le tableau suivant, extrait de l'*Introduction à la mécanique industrielle* de Poncelet, complète le précédent.

Tableau des résistances au glissement, à l'instant du départ et après quelque temps de contact.

PREMIÈRE PARTIE. — *Frottement proprement dit.*

NATURE DES CORPS ET ENDUITS.	OPÉRATEURS.	RAPPORT du frottement à la pression.
Grès uni sur grès uni à sec	Rennie.	0,71
Id. *id.* avec mortier frais	*Id.*	0,66
Calcaire dur poli sur calcaire dur poli	Rondelet.	0,58
Id. bouchardé *id.* bouchardé. .	Boistard.	0,78
Granit bien dressé sur granit bouchardé	Rennie.	0,66
Id. avec mortier frais sur granit bouchardé . . .	*Id.*	0,49
Caisse en bois sur pavé.	Régnier.	0,58
Id. sur la terre battue	Hubert.	0,33
Pierre de libage sur un lit d'argile sèche.	Lesbros.	0,51
Id. l'argile étant humide et ramollie. .	*Id.*	0,34
Id. l'argile pareillement humide, mais recouverte de grosse grève . . .	*Id.*	0,40

DEUXIÈME PARTIE. — *Cohésion ou adhérence.*

La rupture ayant lieu dans l'intérieur de la couche de mortier, ou à la jonction de la couche de plâtre avec les pierres, la résistance est due à la cohésion dans le premier cas, et à l'adhérence dans le second.

NATURE des pièces superposées et de l'enduit.	OPÉRATEURS.	SURFACE en décimètres carrés.	JOURS de contact à l'air ou dans l'eau.	RÉSISTANCE moyenne par mètre carré.
Calcaire bouchardé, fiché sur calcaire bouchardé, avec mortier en chaux grasse et sable fin.	Boistard.	1 à 2	17 à l'air.	6 600 k.
		3 à 5	*id.*	9 400
		47	48 à l'eau.	1 200
Le même, avec mortier en chaux grasse et ciment	*Id.*	1 à 2	17 à l'air.	3 200
		3 à 5	*id.*	5 300
Le même, avec mortier en chaux grasse et ciment, non rompu.	*Id.*	47	48 à l'eau.	1 100
Calcaire tendre de Jaumont, fiché sur calcaire tendre de Jaumont, avec mortier en chaux hydraulique de Metz et sable fin	Morin.	1 à 2	83 à l'air.	18 000
		2 à 3	48 *id.*	12 000
		Id.	43 *id.*	10 100
		4 à 6	48 *id.*	10 000
		7 à 8	48 *id.*	9 400
Briques ordinaires, fichées avec le même mortier.	*Id.*	1,3	48 *id.*	14 000
		2,6	48 *id.*	10 000
Calcaire de Jaumont, fiché sur calcaire de Jaumont, avec plâtre ordinaire.	*Id.*	2,0	48 *id.*	22 000
		8,0	48 *id.*	28 000
Calcaire bleu à gryphite très lisse, sur calcaire bleu à gryphite très lisse, avec plâtre. .	*Id.*	2,5	48 *id.*	11 000
		4,5	48 *id.*	20 000

Le coefficient de glissement 0,78 de la pierre bouchardée sur pierre bouchardée dépasse certainement 1,00 quand les maçonneries sont unies par un mortier de moyenne qualité, dont l'adhérence s'ajoute au frottement.

Ordinairement on prend 0,76 pour la valeur du coefficient de frottement de la maçonnerie sur elle-même. Quelques observations font baisser cette valeur à 0,57 quand le mortier est frais, et la portent, au contraire, à 1,00 quand le mortier, de moyenne qua-

lité a fait prise, et cela pour la maçonnerie de moellons comme pour celle de pierre de taille.

Le coefficient de frottement d'un mur ou d'un massif sur sa fondation se prend égal à 0,76, quand la fondation est un rocher naturel ou qu'elle est en béton; à 0,57 si le mur ou massif repose sur le *sol naturel* (terre ou sable), et à 0,30 environ si le fond est argileux sujet à être détrempé par les eaux.

La cohésion d'un massif sur une base en béton peut varier de 10000 à 144000 kilogrammes par mètre carré, selon la qualité du mortier; mais on ne tient généralement pas compte de cette cohésion dans l'établissement des murs ou massifs soumis à une poussée horizontale, comme dans les murs de soutènement ou les piliers de ponts suspendus, la prise du mortier pouvant n'être pas complète quand la poussée commence à agir. La cohésion de la maçonnerie avec un sol naturel de terre ou de sable est nulle.

59. *Tableau des valeurs du coefficient de frottement des axes en mouvement sur les coussinets* (56).

1° D'APRÈS LE GÉNÉRAL MORIN.

INDICATION des axes.	INDICATION des coussinets.	NATURE DES ENDUITS.	RAPPORT DU FROTTEMENT à la pression. Graissage ordinaire.	RAPPORT DU FROTTEMENT à la pression. Graissage continu.
Fonte.	Fonte.	Huile d'olive, saindoux, suif ou cambouis mou.	0,07 à 0,08	0,054
Id.	*Id.*	Les mêmes enduits, et les surfaces mouillées d'eau	0,08	»
Id.	*Id.*	Asphalte	0,054	»
Id.	*Id.*	Surfaces onctueuses.	0,14	»
Id.	*Id.*	Surfaces onctueuses et mouillées d'eau.	0,14	»
Id.	Bronze.	Huile d'olive, saindoux, suif ou cambouis mou.	0,07 à 0,08	0,054
Id.	*Id.*	Surfaces onctueuses	0,16	»
Id.	*Id.*	Surfaces onctueuses et mouillées d'eau.	0,16	»
Id.	*Id.*	Surfaces très peu onctueuses. . . .	0,19	» (*a*)
Id.	Gaïac.	Sans enduit.	0,18	» (*b*)
Id.	*Id.*	Huile ou saindoux	»	0,090
Id.	*Id.*	Surfaces onctueuses d'huile ou de saindoux.	0,10	»
Id.	*Id.*	Surfaces onctueuses d'un mélange de saindoux et de plombagine. .	0,14	»
Fer.	Fonte.	Huile d'olive, suif, saindoux ou cambouis mou.	0,07 à 0,08	0,054
Id.	Bronze.	Huile d'olive, saindoux ou suif. . .	0,07 à 0,08	0,054
Id.	*Id.*	Cambouis ferme	0,09	»
Id.	*Id.*	Surfaces onctueuses et mouillées d'eau.	0,19	»
Id.	*Id.*	Surfaces très peu onctueuses. . . .	0,25	» (*c*)
Id.	Gaïac.	Huile ou saindoux	0,11	»
Id.	*Id.*	Surfaces onctueuses.	0,19	»
Bronze.	Bronze.	Huile.	0,10	»
Id.	*Id.*	Saindoux	0,09	»
Id.	Fonte.	Huile ou suif.	»	0,045 à 0,052
Gaïac.	*Id.*	Saindoux.	0,12	»
Id.	*Id.*	Surfaces onctueuses	0,15	»
Id.	Gaïac.	Saindoux.	»	0,07

(*a*) Les surfaces commençant à se roder;
(*b*) Les bois étant un peu onctueux;
(*c*) Les surfaces commençant à se roder.

2° D'APRÈS COULOMB.

INDICATION des axes.	INDICATION des coussinets.	NATURE DES ENDUITS.	RAPPORT du frottement à la pression.
Fer.	Cuivre.	Sans enduit	0,155
Id.	*Id.*	Suif.	0,085
Id.	*Id.*	Saindoux.	0,120
Id.	*Id.*	Surfaces onctueuses de suif essuyé	0,127
Id.	*Id.*	Huile d'olive.	0,130
Id.	*Id.*	Surfaces anciennement enduites de suif . . .	0,133
Chêne vert.	Gaïac.	Suif.	0,038
Id.	*Id.*	Surfaces onctueuses de suif essuyé.	0,060
Id.	*Id.*	Surfaces anciennement enduites de suif. . .	0,070
Id.	Orme.	Suif.	0,030
Id.	*Id.*	Surfaces onctueuses de suif essuyé	0,050
Buis.	Gaïac.	Suif.	0,043
Id.	*Id.*	Surfaces onctueuses de suif essuyé	0,070
Id.	Orme.	Suif.	0,035
Id.	*Id.*	Surfaces onctueuses de suif essuyé	0,050
Fer.	Bois.	On ne désigne pas la nature des enduits . .	0,050

(Voir l'article *Tourillons.*)

60. **Travail produit par le frottement.** Les formules suivantes donnent respectivement le travail absorbé par le frottement (28 et 56) : 1° d'un corps qui se meut sur une surface plane, pour un espace quelconque parcouru ; 2° d'un axe qui tourne dans un coussinet, pour une révolution ; 3° de la face horizontale d'un pivot vertical tournant sur une crapaudine, aussi pour une révolution ; 4° d'une couronne ou collet tournant en frottant par une face normale à son axe, également pour une révolution (*Int.* 1695 à 1698).

$$\mathcal{T}=f\mathrm{PE},\quad \mathcal{T}=f\mathrm{P}\times 2\pi r,\quad \mathcal{T}=f\mathrm{P}\times \frac{4}{3}\pi r,\quad \mathcal{T}=f\mathrm{P}\times 2\pi\left(\rho+\frac{1}{12}\frac{l^2}{\rho}\right).$$

$\mathcal{T}$ travail absorbé par le frottement ;
f coefficient de frottement (56) ;
P pression qui s'exerce entre les deux surfaces frottantes ;
E espace parcouru par une surface sur l'autre ;
r rayon du tourillon, de la surface horizontale du pivot et de l'extérieur de la couronne ;
r' rayon intérieur de la couronne ;
$\rho=\frac{r+r'}{2}$ rayon moyen *id.*
$l=r-r'$ largeur de la couronne.

Application. Pour $\mathrm{P}=55$ kilog., $r=0^{m},06$, $r'=0^{m},05$ et $f=0,08$, la dernière formule donne $\mathcal{T}=1^{km},52$. Si l'arbre faisait une révolution par seconde, on voit que le travail absorbé par le frottement serait à peu près le 1/4 de celui produit par un homme agissant sur une manivelle (37).

61. Frottement produit par la garniture d'un piston, et travail absorbé par ce frottement pour un coup de piston :

$$F = \pi D e p f, \qquad \mathcal{T} = \pi D e p f l.$$

F frottement ;
D diamètre du piston ;
e hauteur de la garniture ;
p pression sur un mètre carré de la surface de la partie frottante de la garniture ; c'est la pression du liquide ou du gaz comprimé sur 1 mètre carré de surface, diminuée de la pression derrière le piston sur la même unité de surface ;
$\mathcal{T}$ travail absorbé par le frottement pour une course de piston ;
l course du piston ;
f coefficient de frottement, qui prend les valeurs suivantes (57) :
0,10 à 0,125 pour les garnitures de cuivre enduites sur fonte ;
0,20 pour les garnitures de cuir enduites de plombagine ;
0,29 pour les garnitures de cuir embouti, c'est-à-dire frottant à plat, dans un corps de pompe à eau en bois de chêne ;
0,36 pour les garnitures de cuir embouti mouillé, mais non graissé, dans un corps de pompe en fonte :
0,23 pour ces dernières garnitures onctueuses et imbibées d'eau dans un corps de pompe en fonte.

Les formules précédentes s'appliquent encore aux *stuffing-box*, quand les garnitures sont en cuir embouti, c'est-à-dire lorsqu'elles sont disposées en fermetures autoclaves. Mais pour les boîtes à étoupes, de même que pour les garnitures de piston, formées de chanvre ou de rondelles de cuir superposées, il convient d'avoir recours aux formules empiriques suivantes, dues à Eytelwein :

$$F = nD \frac{p}{1000}, \qquad \mathcal{T} = nD \frac{p}{1000} l.$$

n coefficient égal à 7 pour les corps de pompe en laiton bien poli, à 15 pour ceux en fonte simplement forés, à 25 pour ceux en bois assez lisses, et à 50 pour ceux en bois dégradés par l'usage.
Les autres lettres ont les mêmes significations que ci-dessus.

CORDES ET COURROIES

62. Raideur des cordes. Lorsqu'on vainc une résistance Q au moyen d'une corde qui s'enroule sur une poulie ou sur un tambour, la puissance P doit, pour l'équilibre dynamique, vaincre non seulement la résistance Q et le frottement des tourillons, mais aussi une résistance due à la raideur de la corde, et dont l'effet consiste à infléchir la corde.

Appelant R cette résistance, ou mieux la force qui, d'après les expériences, en agissant à très peu près tangentiellement au cylindre sur lequel s'enroule la corde, fait équilibre à cette résistance, l'équilibre dynamique donne, pour un tour de poulie, en négligeant les frottements et en appelant D le diamètre de la poulie et d celui de la corde :

$$\mathcal{T}_m = P \times \pi(D + d) = Q \times \pi(D + d) + R \times \pi D, \quad \text{d'où} \quad P = Q + R \frac{D}{D + d}.$$

Coulomb a fait quelques expériences pour déterminer la valeur de R. Navier, de la discussion des résultats obtenus par cet expérimentateur, a conclu l'expression suivante pour la valeur de R :

$$R = \frac{1}{D}(ad^{\mu} + bd^{\mu}Q). \qquad (a)$$

ad^{μ} quantité constante pour une même corde ;
$bd^{\mu}Q$ quantité proportionnelle au poids élevé ;
μ nombre qui varie avec l'usure de la corde.

Les expériences de Coulomb sont insuffisantes pour fixer la loi de variation de μ; cependant Navier fait $\mu = 2$ pour les cordes neuves d'un grand diamètre, $\mu = 1,5$ pour les cordes plus qu'à demi usées, et $\mu = 1$ pour les petites ficelles très flexibles.

Navier a admis (ce que ne confirme pas le tableau suivant dû aux expériences de Coulomb) que pour une même résistance utile Q, la résistance due à la raideur d'une corde blanche varie en raison inverse du diamètre de la poulie ou du tambour, et qu'elle est directement proportionnelle à la puissance μ du diamètre de la corde.

De cette hypothèse, il résulte que pour deux cordes de diamètres différents, s'enroulant sur deux poulies de diamètres inégaux, et élevant des poids égaux, on a :

$$R' = R\,\frac{D}{D'}\left(\frac{d'}{d}\right)^{\mu}. \qquad (b)$$

R′ résistance due à la raideur de la corde de diamètre d', s'enroulant sur la poulie dont le diamètre est D′ ;
R résistance due à la raideur de la corde de diamètre d, s'enroulant sur la poulie dont le diamètre est D.

Pour les cordes goudronnées, la raideur ne varie pas sensiblement avec le degré d'usure, et il est plus exact de remplacer, dans la formule précédente, le rapport $\frac{d'^{\mu}}{d^{\mu}}$ par celui $\frac{n'}{n}$, n' et n exprimant les nombres des fils de caret que contiennent les deux cordes; ce qui donne :

$$R' = R\,\frac{D}{D'} \times \frac{n'}{n}.$$

Pour les cordes blanches mouillées, Navier admet que la raideur constante ad^{μ} est double de celle des mêmes cordes sèches, mais que la raideur variable bd^{μ} est la même que pour ces dernières. Les expériences ne paraissent pas assez nombreuses pour conclure d'une manière générale à cet égard.

Tableau de la raideur de différentes cordes s'enroulant sur une poulie de 1 mètre de diamètre, calculée par Navier, d'après les expériences de Coulomb.

DÉSIGNATION des cordes.	NOMBRE de fils de caret.	DIAMÈTRES des cordes.	POIDS des cordes par mètre de longueur.	RAIDEUR constante ad^{μ}.	RAIDEUR variable bd^{μ}, par kilogr. de la charge Q.
		mèt.	kilogr.	kilogr.	kilogr.
Corde blanche neuve..	30	0,0200	0,2834	0,222 46	0,009 7382
id.	15	0,0144	0,1448	0,063 514	0,005 5182
id.	6	0,0088	0,0522	0,010 6038	0,002 3804
Corde goudronnée. . .	30	0,0236	0,3326	0,349 6	0,012 5514
id.	15	0,0168	0,1632	0,105 928	0,006 0592
id.	6	0,0096	0,0693	0,021 208	0,002 5962

Ce tableau montre bien, comme nous l'avons fait remarquer, que les quantités ad^{μ} et bd^{μ} ne varient pas avec la grosseur de la corde suivant une même loi (ad^{μ} croît à peu près proportionnellement à la quatrième puissance du diamètre, et bd^{μ} proportionnellement à la deuxième puissance). Il est donc impossible que l'expression (a) représente exactement la résistance R.

Application. A l'aide de ce tableau, et en admettant les formules précédentes, on peut résoudre tous les problèmes analogues au suivant :

Quelle est la résistance due à la raideur d'une corde blanche neuve de $0^{m},0254$ *de diamètre, s'enroulant sur une poulie de* $0^{m},40$ *de diamètre et élevant un poids de* 500 *kilog.?*

La corde blanche neuve du tableau, dont le diamètre $0^{m},02$ s'approche le plus de $0^{m},0254$, donne, en remplaçant les lettres par leurs valeurs dans la formule (a) :

$$R = \frac{1}{0,40}(0,22246 + 0,0097382 \times 500) = 12^{k},73.$$

Alors pour la corde de $0^{m},0254$ de diamètre, placée dans les mêmes circonstances, on aura [formule (b)]

$$R' = 12,73\left(\frac{0,0254}{0,02}\right)^{2} = 20^{k},53.$$

Morin, reprenant la discussion des résultats de Coulomb, a conclu en appelant A et B les deux quantités que Navier a représentées par ad^{μ} et bd^{μ} :

1° Que pour les cordes en chanvre non goudronnées, dites *cordes blanches*, sèches ou imbibées d'eau, en bon état, A et B varient à peu près proportionnellement au carré du diamètre de la corde;

2° Que pour ces mêmes cordes à demi usées, A et B varient comme les puissances $1,5 = \frac{3}{2}$, c'est-à-dire comme les racines carrées des cubes des diamètres des cordes (*Int.* 517);

3° Que pour les cordes goudronnées, B est proportionnel au nombre des fils de caret de la corde.

De cette discussion, Morin a conclu les formules suivantes, dans lesquelles n désigne le nombre des fils de caret, et D le diamètre de la poulie :

1° *Cordes blanches :*

$$A = (0{,}000297 + 0{,}000245n)n \quad \text{et} \quad B = 0{,}000363n,$$

d'où

$$R = \frac{1}{D}[(0{,}000297 + 0{,}000245n)n + 0{,}000363nQ] \text{ kil.}$$

2° *Cordes goudronnées :*

$$A = (0{,}0014575 + 0{,}000346n)n \quad \text{et} \quad B = 0{,}000418144n,$$

d'où

$$R = \frac{1}{D}[(0{,}0014575 + 0{,}000346n)n + 0{,}000418nQ] \text{ kil.}$$

Le général Morin, en faisant usage de ces formules, a calculé les résultats du tableau suivant pour une poulie de 1 mètre de diamètre :

NOMBRE DE FILS.	CORDES BLANCHES.			CORDES GOUDRONNÉES.		
	Diamètre.	Raideur constante A.	Raideur variable B. par kilogramme de la charge Q	Diamètre.	Raideur. constante A.	Raideur variable B par kilogramme de la charge Q.
	mèt.	kilogr.	kilogr.	mèt.	kilogr.	kilogr.
6	0,0089	0,0106038	0,002178	0,0105	0,021201	0,002509
9	0,0110	0,0225207	0,003267	0,0129	0,041143	0,003763
12	0,0127	0,0388476	0,004356	0,0149	0,067314	0,005018
15	0,0141	0,0595845	0,005445	0,0167	0,097712	0,006272
18	0,0155	0,0847314	0,006534	0,0183	0,138339	0,007527
21	0,0168	0,1142883	0,007623	0,0198	0,183193	0,008781
24	0,0179	0,1482552	0,008712	0,0211	0,234276	0,010035
27	0,0190	0,1866321	0,009801	0,0224	0,291586	0,011290
30	0,0200	0,2294190	0,010890	0,0236	0,355125	0,012544
33	0,0210	0,2766159	0,011979	0,0247	0,424891	0,013799
36	0,0220	0,3282228	0,013068	0,0258	0,500886	0,015053
39	0,0228	0,3842397	0,014157	0,0268	0,583108	0,016308
42	0,0237	0,4446666	0,015246	0,0279	0,671558	0,017562
45	0,0246	0,5095035	0,016335	0,0289	0,766237	0,018816
48	0,0254	0,5787504	0,017424	0,0298	0,867144	0,020071
51	0,0261	0,6524073	0,018513	0,0308	0,974278	0,021325
54	0,0268	0,7304742	0,019602	0,0316	1,087641	0,022580
57	0,0276	0,8129511	0,020691	0,0326	1,207231	0,023834
60	0,0283	0,8998380	0,021780	0,0334	1,333050	0,025089

Application. Soit à résoudre le même problème que page 35. Substituant les valeurs de A et B correspondant au diamètre $0^m{,}0254$ dans la formule :

$$R = \frac{1}{D}(A + BQ),$$

on a, en remarquant que $n = 48$:

$$R = \frac{1}{0,40}(0,578\,7504 + 0,017\,424 \times 500) = 23^k,23,$$

au lieu de $20^k,53$ que nous avons trouvé en faisant usage de la table de Navier.

Pour un tour de poulie, le travail absorbé par cette résistance est :

$$\mathcal{T}_n = \pi D \times 25^k,23 = 3,14 \times 0,40 \times 23,23 = 29^{km},18.$$

La puissance a pour expression ($d =$ diam. de la corde) :

$$P = Q + R\frac{D}{D+d} = 500 + 23,23\frac{0,40}{0,40 + 0,0254} = 521^k,84.$$

Le travail utile est, pour un tour de poulie :

$$\mathcal{T}_u = \pi(D + d) \times Q = 1,336 \times 500 = 668^{km},$$

et le travail moteur :

$$\mathcal{T}_m = P\pi(D + d) = \mathcal{T}_u + \mathcal{T}_n = 668 + 29,18 = 697^{km},18.$$

Dans la pratique, il convient, quand cela est possible, de remplacer les cordes rondes par des cordes plates, qui ont plus de flexibilité et plus de durée.

On diminue beaucoup la raideur des cordes en les imprégnant d'un corps gras, ou en les frottant avec du savon.

63. Équilibre dynamique de la poulie (*Int.* 1700).

Fig. 1.

Négligeant le poids de la poulie, le système est soumis à l'action de cinq forces :

- P puissance ;
- Q résistance ;
- N réaction normale du support sur les tourillons ou l'œil de la poulie ;
- Nf frottement des tourillons (59). Ordinairement les surfaces frottantes n'étant qu'un peu onctueuses, il convient de faire $f = 0,15$;
- $\frac{1}{D}(A + BQ)$ raideur de la corde (62).

Pour un tour de poulie, l'équilibre dynamique donne, en remarquan que le travail de la réaction normale est nul :

$$P2\pi r = Q2\pi r + Nf2\pi r' + \frac{\pi D}{D}(A + BQ).$$

Remarquant que la résultante N_1 des réactions N et Nf est égale et directement opposée à la résultante de P et Q, cela permet d'éliminer N dans l'équation précédente, qui donne alors :

$$P = Q + \frac{1}{2r}(A + BQ) + f_1\frac{r'}{r}\sqrt{P^2 + Q^2 + 2PQ\cos\omega}.$$

$$f_1 = \frac{f}{\sqrt{1 + f^2}};$$

ω angle que font entre eux les deux brins de la corde ou les deux forces P et Q.

Quand les deux forces P et Q sont parallèles, on a $\omega = 0$, $\cos \omega = 1$, et la formule précédente devient :

$$P = \frac{1}{r - f_1 r'} \left[\frac{1}{2} A + \left(r + \frac{1}{2} B + f_1 r'\right) Q\right]. \qquad (a)$$

Pour les données du n° 62, c'est-à-dire pour $Q = 500$ kil., un diamètre de poulie $D = 0^m,40$, et un diamètre de corde $d = 0^m,0254$, d'où $r = 0^m,2127$, supposant $r' = 0^m,01$, on a d'abord $f'' = 0,1484$, puis la formule (a) donne $P = 529$ kil.

Remarque. La formule (a) fait voir que la valeur de P se compose de deux parties : la première $\frac{A}{2(r - f_1 r')}$, qui est constante pour une même poulie et une même corde, et que l'on peut représenter par α; la deuxième $\frac{(r + \frac{1}{2} B + f_1 r') Q}{r - f_1 r'}$, qui est proportionnelle à Q, et que l'on peut représenter par βQ; ce qui permet de mettre la valeur de P sous la forme :

$$P = \alpha + \beta Q.$$

64. Équilibre dynamique de la moufle ou du palan, en négligeant le poids de la corde, celui des poulies et le frottement latéral des poulies, et en supposant que ces poulies ont même diamètre et que les cordons sont parallèles (*Int.* 1701).

Fig. 2.



Appelant :

P la puissance, c'est-à-dire la tension du cordon libre ou *garant;*
Q la résistance utile;
t_1, t_2, t_3... t_n, les tensions des divers cordons allant d'une chape à l'autre;
n le nombre des cordons allant d'une chape à l'autre;
α et β les fonctions déterminées comme à la remarque précédente,

on a (63) :

$$t_2 = \alpha + \beta t_1$$
$$t_3 = \alpha + \beta t_2$$
$$\cdots\cdots$$

D'où il résulte qu'assignant une valeur arbitraire à t_1, on peut déterminer les valeurs correspondantes de t_2, t_3... t_n et P. Mais remarquant que l'on a $Q = t_1 + t_2 + \ldots + t_n$, de ces diverses formules, on conclut la suivante, qui donne directement la valeur de P en fonction de Q :

$$P = \alpha \left(\frac{n\beta^n}{\beta^n - 1} - \frac{1}{\beta - 1}\right) + \frac{(\beta - 1)\beta^n}{\beta^n - 1} Q. \qquad (a)$$

En négligeant toutes les résistances passives, on aurait :

$$t_1 = t_2 = \dots = t_n = \text{P} \quad \text{et} \quad \text{Q} = t_1 + t_2 + \dots + t_n = n\text{P}.$$

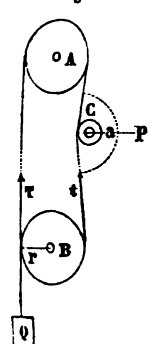
Ainsi la tension de chacun des cordons serait égale à la puissance P, et la résistance Q serait égale à la puissance P multipliée par le nombre n des cordons allant d'une chape à l'autre.

La vitesse de Q est à celle de P dans le rapport $\frac{\text{P}}{\text{Q}} = \frac{\text{P}}{n\text{P}} = \frac{1}{n}$, c'est-à-dire que la vitesse de Q est égale à celle de P divisée par le nombre des cordons allant d'une chape à l'autre. Il est évident que, sauf l'allongement inégal des cordons sous des charges différentes, le rapport des vitesses de Q et de P est le même, que l'on tienne ou non compte des résistances passives.

Pour soulever un poids Q = 500 kil., D = 0m,10 étant le diamètre des poulies et $r' = 0^{\text{m}},005$ le rayon de l'œil, le nombre des brins allant d'une chape à l'autre étant 6, comme dans la figure, et le diamètre d de ces brins, 0m,011, on a d'abord $f_1 = 0{,}1484$ (63); puis $\alpha = 0{,}20564$, $\beta = 1{,}0569$, et la formule précédente (a) donne $\text{P} = 105^{\text{k}},29$; au lieu de $\text{P} = \frac{500}{6} = 83^{\text{k}},33$ qu'on aurait eu si les résistances passives eussent été nulles.

65. Frottement d'une corde ou d'une courroie sur un cylindre fixe. La force T capable de faire glisser une corde ou une courroie sur un cylindre fixe B en la tirant par une de ses extrémités, cette corde ou cette courroie étant sollicitée à son autre extrémité par une force t, est donnée par la formule :

Fig. 3.



$$\text{T} = t(e)^{\frac{fs}{r}}, \text{ d'où } (\textit{Int.}\ 407),\ \log \text{T} = \log t + (\log e)\frac{fs}{r}.$$

- T force qui produit le mouvement;
- t force qui s'oppose au mouvement;
- $e = 2{,}71828$ base des logarithmes népériens (*Int.* 409);
- $\text{Log}\, e = 0{,}4342945$, soit 0,4343;
- f coefficient de frottement (56);
- s longueur en mètres de l'arc embrassé par la corde ou la courroie sur le rouleau;
- r rayon du rouleau B.

D'après les expériences du général Morin, les valeurs de f sont (57) :

0,47	pour des courroies	à l'état ordinaire d'onctuosité sur des tambours en bois;	
0,50	*id.*	neuves	*id.*
0,28	*id.*	à l'état ordinaire d'onctuosité sur des poulies en fonte;	
0,38	*id.*	humides	*id.*
0,50	pour des cordes de chanvre sur des poulies ou tambours en bois.		

La formule fait voir que, pour une même valeur de t, T ne dépend pas seulement de s, mais bien de $\frac{s}{r}$, c'est-à-dire du nombre de degrés

de l'arc embrassé: ainsi il est inutile d'augmenter démesurément le diamètre des tambours dans l'unique but d'empêcher le glissement des courroies (tableau n° 66).

66. Transmission de mouvement au moyen d'une corde ou d'une courroie sans fin. Quand, au moyen d'une corde ou d'une courroie sans fin, on transmet le mouvement d'une poulie A (*fig.* 3) à une autre poulie B, à l'extrémité du rayon de laquelle agit une résistance Q qui s'oppose au mouvement, on a, en appelant T la tension du brin conducteur, t celle du brin conduit, et T' la tension commune des deux brins en repos :

$$T' = \frac{T+t}{2}, \quad (a) \quad \text{et} \quad T - t = Q. \quad (b)$$

Pour que la courroie ne glisse pas sur la poulie B, il faut que son frottement sur cette poulie soit au moins égal à Q.

Ayant (65) $$T = t(e)^{\frac{fs}{r}}, \quad (c)$$

des équations (*b*) et (*c*) on conclut :

$$t = \frac{Q}{(e)^{\frac{fs}{r}} - 1}. \quad (d)$$

L'équation (*d*) donne la valeur de t, qu'en pratique on augmente de 1/10, afin de s'assurer que la courroie ne glissera pas. Cette valeur, mise dans l'équation (*b*), fournit T, et les valeurs de T et t, substituées dans l'équation (*a*), donnent T'.

Application. Supposons que la demi-circonférence de la poulie en fonte B (*fig.* 3) soit embrassée par une courroie de transmission qui donne $f = 0{,}28$ (65), et que l'on ait $r = 0^m{,}30$ et $Q = 50$ kilog. La formule (*d*) donne :

$$t = \frac{Q}{(e)^{\frac{fs}{r}} - 1} = \frac{50}{(2{,}71828)^{\frac{0{,}28 \times 3{,}14 \times 0{,}30}{0{,}30}} - 1},$$

d'où (*Int.* 407) : $$t = \frac{50}{2{,}41 - 1} = 35^k{,}46.$$

Augmentant cette valeur de 1/10 pour s'assurer que la courroie ne glissera pas, on a $t = 39$ kilog.

La formule (*b*) donne alors :

$$T = t + Q = 39 + 50 = 89 \text{ kilogr.},$$

et la formule (*a*) :

$$T' = \frac{T+t}{2} = \frac{89+39}{2} = 64 \text{ kilogr.}$$

Ce calcul doit être fait pour la poulie qui donne la plus grande valeur de t; ainsi les deux poulies étant de même matière, on devra cal-

culer t pour celle qui est la plus petite, c'est-à-dire pour celle dont la portion de circonférence embrassée est la plus petite.

La tension T étant plus grande que celle t, le brin conducteur est plus allongé que le brin conduit, et il en résulte pour la poulie conduite un ralentissement de 1/50 environ (Note de M. Krest, *Ann. des mines*, 1862).

Le tableau suivant, que nous extrayons de l'*Aide-mémoire* de Morin, donne les valeurs de $(e)^{\frac{fs}{r}}$ pour différents rapports de l'arc embrassé à la circonférence entière; ce qui abrégera considérablement, pour ses rapports, le calcul de t, ainsi que celui de T dans les applications relatives au n° 65.

RAPPORT de l'arc embrassé à la circonférence entière.	VALEURS DE $(e)^{\frac{fs}{r}}$ POUR DES					
	courroies neuves sur des tambours en bois.	courroies à l'état ordinaire		courroies humides sur des poulies en fonte.	cordes sur des tambours ou des treuils en bois	
		sur des tambours en bois.	sur des poulies en fonte.		brut.	poli.
0,2	1,87	1,80	1,42	1,61	1,87	1,51
0,3	2,57	2,43	1,69	2,05	2,57	1,86
0,4	3,51	3,26	2,02	2,60	3,51	2,29
0,5	4,81	4,38	2,41	3,30	4,81	2,82
0,6	6,59	5,88	2,87	4,19	6,58	3,47
0,7	9,00	7,90	3,43	5,32	9,01	4,27
0,8	12,34	10,62	4,09	6,75	12,34	5,25
0,9	16,90	14,27	4,87	8,57	16,90	6,46
1,0	23,14	19,16	5,81	10,89	23,90	7,95
1,5	»	»	»	»	111,31	22,42
2,0	»	»	»	»	535,47	63,23
2,5	»	»	»	»	2575,80	178,52

67. Rouleaux de tension. Pour maintenir constante la tension des cordes ou des courroies sans fin, malgré leur allongement, on fait usage d'un rouleau de tension (*fig.* 3), dont la pression sur la courroie est donnée par la formule:

$$p = 2t' \cos \frac{1}{2} a. \qquad (Int.\ 1524)$$

p pression du rouleau sur la corde ou courroie, suivant la bissectrice de l'angle a que font entre elles les deux parties du brin sur lequel il agit;

t' tension des deux parties du brin sur lequel agit le rouleau; dans le cas de la figure 3, on a $t' = t$.

L'angle a, qui est toujours très obtus, se mesure sur la courroie mise en place.

Supposant l'angle $a = 170°$ ou $\frac{1}{2} a = 85°$ dans l'exemple du n° 66, on a, en remplaçant les lettres par leurs valeurs dans la formule précé-

dente (*Int.* 1094) :

$$p = 2 \times 39 \times 0{,}08716 = 6^{k},80.$$

Remarque. Afin que les courroies ne quittent pas les poulies sur lesquelles elles passent, il convient que les pourtours de ces poulies aient une convexité égale à 1/10 de leur largeur.

68. Largeur des courroies. On peut, sans craindre un allongement trop rapide des courroies de transmission de mouvement, leur faire subir un effort de 1/4 de kilogramme par millimètre carré de section; ce qui permettra de calculer leur largeur, connaissant l'épaisseur du cuir à employer.

Au moulin de M. Darblay, à Corbeil, le mouvement est communiqué à chaque meule à l'aide d'une courroie qui passe sur deux poulies de même diamètre, dont l'une est montée sur l'arbre de la meule. Dans les moulins à l'anglaise, les meules ont $1^{m},30$ de diamètre, et leur vitesse de régime est de 120 révolutions par minute. Chez M. Darblay, les poulies motrices ont $1^{m},30$ de diamètre comme les meules, et une largeur de $0^{m},12$; elles sont tournées avec beaucoup de soin et légèrement bombées sur le pourtour, afin que la courroie ne glisse pas. Les courroies enveloppent ces poulies sur la moitié de leur circonférence; elles ont de $0^{m},10$ à $0^{m},11$ de largeur; elles sont en cuir de bonne qualité, bien corroyé; leur longueur est telle, qu'elles deviennent complètement lâches quand on soulève le rouleau de tension; ce qui fournit un moyen facile de débrayer et d'embrayer. Avec une telle vitesse de poulies, $3{,}14 \times 1{,}30 \times 2 = 8^{m},16$ par seconde, les courroies n'ont pas besoin d'être fortement tendues; aussi, quoique le travail à transmettre puisse s'élever quelquefois à plus de trois chevaux, le contrepoids adapté au levier des tendeurs est-il extrêmement faible.

Dans la pratique, les courroies enveloppant la moitié de la circonférence des poulies, leur largeur se détermine ordinairement au moyen de la formule empirique :

$$l = k\frac{f}{v}.$$

l largeur de la courroie, en mètres ;
f puissance à transmettre, en chevaux ;
v vitesse de la courroie, en mètres par seconde ;
k coefficient, qu'on fait égal à 0,15 pour les arbres de couche, et à 0,20 pour les arbres verticaux.

Dans un travail présenté par M. Laborde à la Société industrielle de Mulhouse, cet ingénieur, avant de poser le principe sur lequel il base le calcul des largeurs à donner aux courroies, fait les observations suivantes :

1° La résistance à vaincre doit être moindre que la force qui ferait glisser la courroie sur la poulie;

2° La tension ne doit pas aller au point d'étendre le cuir;

3° La tension ne doit pas non plus augmenter inutilement le frottement sur les pivots ou les coussinets;

4° Une courroie doit être flexible, c'est-à-dire qu'elle doit se ployer facilement dans toutes ses parties.

Les trois premières conditions sont évidentes; quant à la quatrième, on en conclut qu'une courroie ne doit jamais être doublée, mais bien se composer seulement d'une seule épaisseur de cuir. L'auteur conseille, pour empêcher les courroies de se dessécher, de les graisser de temps à autre avec du suif pur ou mêlé de saindoux, ce qui se fait très bien pendant la marche; cela les rend flexibles et en augmente la durée. L'expérience a montré que les poulies à surface lisse étaient préférables à celles qui seraient rayées dans un sens ou dans un autre, parce que les premières offrent un plus grand nombre de point de contact.

Après ces considérations, M. Laborde pose les principes suivants :

1° Les largeurs des courroies doivent être en raison directe des puissances à transmettre, la vitesse étant la même;

2° Les largeurs des courroies sont en raison inverse des vitesses avec lesquelles elles se meuvent, pour un même travail transmis.

D'où l'on conclut, l, l' étant les largeurs de deux courroies, f, f' les puissances transmises, et v, v' les vitesses :

$$l : l' = \frac{f}{v} : \frac{f'}{v'}, \quad \text{d'où} \quad l' = l\frac{f'v}{fv'}.$$

M. Laborde a reconnu par expérience qu'une courroie de $0^m,081$ de largeur, marchant avec une vitesse de $162^m,50$ par minute, peut très bien, avec une tension ordinaire, et sans se déformer, transmettre une force de 1 cheval-vapeur, cette courroie agissant sur des poulies non *rayées*, mais tournées lisse et d'égal diamètre, c'est-à-dire embrassées sur la moitié de leur circonférence. Partant de cette donnée, à l'aide de la formule précédente, on peut calculer la largeur à donner à une courroie marchant dans des conditions déterminées : ainsi, pour transmettre une puissance de 2 chevaux avec une vitesse de courroie de $112^m,50$, on devra prendre :

$$l' = 0,081\,\frac{2 \times 162,50}{1 \times 112,50} = 0^m,234.$$

C'est en opérant ainsi que la table suivante a été calculée.

Les valeurs $l = 0^m,081$, $f = 1$ et $v = \frac{162,50}{60} = 2^m,70833$, qui servent de base à la table suivante, étant substituées dans la formule empirique (a), de cette formule on tire $k = 0,21937$, soit $k = 0,22$. Ainsi l'on peut considérer les largeurs du tableau suivant comme des maximums, que l'on ramènera aux conditions de la formule (a) en les multipliant par $\frac{15}{22}$ ou $\frac{20}{22} = \frac{10}{11}$, selon qu'il s'agira d'arbres de couche ou d'arbres verticaux.

Vitesse par minute en mètres.	Largeur des courroies en millimètres, pour des forces de 1/10 à 9/10 de cheval								
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
20	68	132	196	264	328	396	»	»	»
25	52	106	158	208	261	316	370	422	»
30	44	88	132	174	220	264	308	348	394
35	38	76	114	150	188	226	264	302	340
40	34	66	98	132	164	198	230	264	296
45	30	58	88	118	146	176	206	234	264
50	26	53	79	106	132	158	185	211	237
60	22	44	66	87	110	132	154	174	197
70	19	38	57	75	94	113	132	151	170
80	17	33	49	66	82	99	115	132	148
90	15	29	44	59	73	88	103	117	132
100	13	26	40	53	66	79	92	106	119
110	12	24	36	48	60	72	84	96	108
120	11	22	33	44	55	66	77	88	99
130	10	20	30	41	51	61	71	81	91
140	9	19	28	38	47	57	66	75	85
150	9	18	26	35	44	53	62	70	79
160	8	17	25	33	41	49	58	66	74
170	8	16	23	31	39	47	54	62	70
180	»	15	22	29	37	45	51	59	66
190	»	14	21	28	35	42	49	56	60
200	»	13	20	26	33	40	46	53	55
220	»	12	18	24	30	36	42	48	51
240	»	11	17	22	28	33	39	44	47
260	»	10	15	20	26	30	35	41	44
280	»	9	14	19	24	28	33	38	41
300	»	9	13	18	22	26	31	35	39
320	»	8	12	16	21	25	29	33	37
340	»	8	12	16	19	23	27	31	35
360	»	»	11	15	18	22	26	29	33
380	»	»	10	14	17	21	24	28	30
400	»	»	10	13	16	20	23	26	28
440	»	»	9	12	15	18	21	24	26
480	»	»	9	11	14	17	19	22	25
500	»	»	»	11	13	16	18	21	24

Vitesse par minute en mètres.	Largeur des courroies en millimètres, pour des forces en chevaux de									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
60	220	440	»	»	»	»	»	»	»	»
70	188	377	565	»	»	»	»	»	»	»
80	165	329	494	»	»	»	»	»	»	»
90	147	293	440	586	»	»	»	»	»	»
100	132	264	396	528	»	»	»	»	»	»
110	120	240	360	480	606	»	»	»	»	»
120	110	220	330	440	550	»	»	»	»	»
130	101	203	304	406	507	608	»	»	»	»
140	94	188	283	377	471	565	»	»	»	»
150	88	176	264	352	440	527	615	»	»	»
160	82	165	247	329	412	494	576	»	»	»
170	78	155	233	310	388	466	543	621	»	»
180	73	147	220	293	367	440	512	586	»	»
190	69	139	208	278	347	416	486	555	»	»
200	66	132	198	264	330	396	462	528	594	»
220	60	120	180	240	300	360	420	480	540	600
240	55	110	165	220	275	330	385	440	495	550
260	51	101	152	203	254	304	355	406	457	507
280	47	94	141	188	236	283	330	377	424	471
300	44	88	132	176	220	264	308	352	396	440
320	41	82	124	165	206	247	288	330	371	412
340	39	80	116	155	194	233	272	310	349	388
360	37	73	110	146	183	220	256	293	329	366
380	35	69	104	139	174	208	243	278	313	347
400	33	66	99	132	165	193	231	264	297	330
440	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
480	28	55	83	110	138	165	193	220	248	275
500	26	53	79	106	132	158	185	211	238	264
520	25	51	76	102	127	152	178	203	229	254
560	24	47	71	94	118	142	165	189	212	236
600	22	44	66	88	110	132	154	176	198	220
650	20	41	61	81	102	122	142	162	183	203
700	»	38	56	75	94	113	132	150	169	188
800	»	33	50	66	83	99	116	132	149	165
900	»	29	44	59	74	88	103	118	133	147
1000	»	26	40	53	66	79	92	106	119	132

Toutes choses égales d'ailleurs, il est évident que les largeurs données au tableau précédent, ou celles fournies par la formule empirique du n° 68, doivent être modifiées quand la courroie n'enveloppe pas la moitié de la poulie, puisqu'alors le frottement Q restant le même, la tension de la courroie doit varier.

On détermine les rapports de Q à t pour différents arcs embrassés, par la formule (66); ce qui donne :

$$t = \frac{Q}{e^{\frac{fs}{r}} - 1}, \quad \text{d'où} \quad \frac{Q}{t} = e^{\frac{fs}{r}} - 1;$$

de plus, comme la largeur de la courroie varie proportionnellement à T, ou à t qui lui est proportionnel, elle varie donc en sens inverse de la valeur

du rapport $\frac{Q}{l}$. Ainsi connaissant la largeur l qu'il convient de donner à une courroie qui enveloppe, par exemple, la moitié d'une poulie, pour avoir la largeur l' à donner à une courroie qui n'envelopperait pas la moitié d'une poulie de même nature, ayant même vitesse à la circonférence, et transmettant la même puissance, c'est-à-dire donnant le même frottement Q, on posera :

$$l' : l = \left(e^{\frac{fs}{r}} - 1\right) : \left(e^{\frac{fs'}{r}} - 1\right), \quad \text{d'où} \quad l' = l\,\frac{e^{\frac{fs}{r}} - 1}{e^{\frac{fs'}{r}} - 1}.$$

Formule qui donnera l', après avoir calculé séparément $e^{\frac{fs}{r}} - 1 = 1,41$ qui se rapporte à l, et $e^{\frac{fs'}{r}} - 1$ qui se rapporte à l'.

Le tableau suivant donne, pour des poulies en fonte, les résultats de ces calculs pour les arcs embrassés consignés dans la première colonne.

RAPPORT de l'arc embrassé à la circonférence entière.	VALEUR DE $e^{\frac{fs'}{r}} - 1$	VALEUR DE $\frac{1,41}{e^{\frac{fs'}{r}} - 1}$
0,2	0,42	3,36
0,3	0,69	2,04
0,4	1,02	1,38
0,5	1,41	1,00
0,6	1,87	0,75
0,7	2,43	0,58
0,8	3,09	0,46
0,9	3,87	0,36
1,0	4,81	0,29

1re *Application.* Quelle est la largeur à donner à une courroie qui doit transmettre une puissance de 0,6 de cheval, la vitesse de la courroie étant de 80 mètres par minute, et la poulie étant enveloppée sur les 0,6 de sa circonférence ?

Le tableau page 44 donnant $l = 0^m,099$ lorsque la poulie est enveloppée sur la moitié de la circonférence, cherchant dans la troisième colonne du tableau précédent le nombre qui correspond à l'arc 0,6, il en résulte que la largeur à donner à la courroie est :

$$l' = 0^m,099 \times 0,75 = 0^m,074.$$

2e *Application.* Pour une puissance de quatre chevaux, une vitesse de courroie de 400 mètres, et un arc embrassé sur la petite poulie de 0,4, le tableau page 44, donne $l = 0^m,132$, et par suite on a :

$$l' = 0,132 \times 1,38 = 0^m,182.$$

Tout ce qui précède suppose le cuir de bonne qualité, et d'une épaisseur ordinaire et uniforme; mais il est évident que lorsqu'il s'agira de transmettre de faibles puissances avec de grandes vitesses, il conviendra de réduire l'épaisseur des courroies et d'augmenter leur largeur, afin d'obtenir la même résistance et plus de flexibilité; alors on déterminera les dimensions de la section de la courroie d'après la règle donnée au commencement de ce numéro. L'épaisseur ordinaire des cuirs employés pour les courroies varie de 2 à 3 millimètres.

69. **Transmission par câbles métalliques.** On emploie avec succès, pour transmettre le mouvement à de grandes distances, des câbles en fil de fer passant sur des poulies à gorge.

Après plusieurs tentatives infructueuses faites en 1850, à l'aide de lames de fer aciéré commandées par des poulies, M. Hirn s'est arrêté à l'adoption de câbles en fil de fer non recuit enroulés sur des poulies à gorge d'un grand diamètre.

Les poulies peuvent être en bois dur (chêne); elles doivent être à gorge profonde légèrement arrondie, de $0^m,04$ à $0^m,05$ de profondeur et $0^m,03$ à $0^m,04$ de largeur. Le fond de la gorge est garni d'une bande en cuir ou en gutta-percha.

Les poulies doivent avoir la plus grande vitesse possible, sans dépasser cependant 32 mètres et un diamètre qui ne peut être inférieur à 1 mètre.

La plus courte distance à admettre entre deux poulies est d'environ 40 à 50 mètres. Au contraire, il n'y a pour ainsi dire aucune limite de distance au delà de ce chiffre minima. C'est ainsi que dans l'établissement de MM. Haussmann, Jourdan, Hirn et Ce, situé à Colmar, on a installé, avec le plus grand succès, une transmission de la force de 47 chevaux à la distance de 232 mètres, par un câble de $0^m,012$ de diamètre soutenu dans son milieu par un simple galet. La poulie commandée a 3 mètres de diamètre; son centre est à $3^m,36$ au-dessus du sol. La poulie de commande, faisant 95 tours par minute, a également 3 mètres de diamètre. Au milieu de la distance de ces poulies sont placés deux galets de support de 1 mètre de diamètre, distant verticalement de 3 mètres environ. Le centre du galet inférieur est à $5^m,04$ au-dessus du sol. Les points les plus bas du brin inférieur du câble sont à $1^m,70$ au-desus du sol, entre les galets et la poulie commandée, et à $2^m,64$ entre les galets et la poulie de commande. La force perdue en frottement est inférieure à 3 p. 100.

On peut sans inconvénient faire franchir aux câbles en fil de fer les jardins, les hangars, les routes, les canaux. Il est même à remarquer que plus l'éloignement des poulies est considérable, plus le mouvement est doux. D'ailleurs il n'est pas nécessaire que les deux poulies soient au même niveau.

Ce genre de transmission se prête à de grandes variations de vitesse; M. Hirn imprime aux câbles une vitesse de 15 à 16 mètres par seconde, mais cette vitesse peut s'élever jusqu'à 32 mètres.

Les poulies doivent avoir un grand diamètre: 150 à 200 fois celui du câble.

Les câbles simples les plus généralement employés sont ceux de 4, 6, 9 et 12 millimètres de diamètre. S'ils sont composés, ils sont formés de fils dont le diamètre varie d'un demi-millimètre à 2 millimètres, comprenant 36 fils assemblés en 6 torons de 6 fils chacun réunis autour d'une âme centrale en chanvre. Chaque toron renferme également une âme en chanvre. Le numéro ou la grosseur des fils varie nécessairement selon le diamètre qu'il s'agit de donner au câble.

On fait aussi des câbles comprenant 48, 54, 60, 66, 72 et jusqu'à 120 fils.

70. L'extrême facilité d'exécution de ce mode de transmission et son bon marché ont vulgarisé rapidement cette découverte, qui a été livrée complètement à l'industrie privée par son auteur, M. Hirn, qui ne s'en est pas réservé le bénéfice par la demande d'un brevet. Sept de ces câbles sont installés dans l'établissement de Logelbach pour répartir la puissance motrice dans les différents ateliers. Ils ne donnent lieu à aucun entretien dispendieux ou embarrassant; on les garantit de l'oxydation par l'application d'une couche légère d'un mélange d'huile et de goudron renouvelée environ deux fois par mois.

Ces câbles peuvent aussi trouver un emploi avantageux sur les grands chantiers de travaux publics pour communiquer, par des transmissions aériennes, le mouvement d'un même moteur aux diverses machines-outils qui peuvent y être employées.

Pour le service des mines, les câbles sont plus forts que les précédents : chaque toron est formé d'une âme en chanvre autour de laquelle s'enroulent en hélice une dizaine de fils, et chaque câble, de 5 à 6 torons contournés autour d'un toron en chanvre. Ces âmes en chanvre ont pour objet d'augmenter le diamètre et la flexibilité des câbles.

Pour former un câble plat, on réunit par juxtaposition 3 ou 4 câbles ronds, et on les coud ensemble avec du fil de fer recuit, que l'on fait pénétrer à travers les câbles à l'aide d'une aiguille en fer flexible, en ayant soin de ne jamais traverser un toron. Les câbles plats s'emploient du reste assez rarement.

Nota. Nous renvoyons le lecteur aux n° 71 à 73 pour le calcul des câbles télédynamiques qui exigent certaines conditions pour que le mouvement soit communiqué d'une poulie à l'autre sous l'action du poids même du câble. On conçoit, en effet, que la longueur des câbles n'est pas arbitraire et qu'elle est liée aux données principales qui sont : 1° la distance à laquelle la transmission doit se faire; 2° l'effort tangentiel à transmettre qui, ordinairement, se déduit de la puissance dynamique en chevaux qu'il s'agit de transmettre à distance.

Tableau des câbles en fil de fer fabriqués par MM. Harmegnies, Dumont et Cie, à Anzin, et des charges qu'ils peuvent tirer à une profondeur de 400 mètres.

CORDES PLATES en fil de fer au bois première qualité.						CORDES RONDES en fil de fer au bois première qualité.				
Nombre d'aussières.	Largeur.	Épaisseur.	Poids par mètre courant.	Propre à l'extraction d'une charge de	Prix par kilogr.	Numéros d'ordre.	Diamètre.	Poids par mètre courant.	Propre à l'extraction d'une charge de	Prix par kilogr.
	mèt.	mèt.	kil.	kil.	fr.		mèt.	kil.	kil.	fr.
8	0,13	0,022	8,00	5 000	1,30	10	0,033	3,25	3000	1,20
8	0,12	0,020	6,50	4 500		11	0,028	2,50	2 500	
6	0,10	0,021	6,00	4 000		12	0,025	1,90	2000	
8	0,11	0,017	5,50	3 500	»	13	0,021	1,50	1 500	
6	0,09	0,020	5,00	3 000		14	0,018	1,30	1 000	1,25
6	0,08	0,017	4,50	2 500		15	0,016	1,00	750	
6	0,08	0,016	4,00	2 000	»	16	0,015	0,75	500	
6	0,07	0,015	3,50	1 800		17	0,013	0,50	250	
4	0,06	0,014	3,00	1 500						

Comme la résistance à la rupture des bons fils de fer peut s'élever jusqu'à 70 kilogrammes par millimètre carré de section et qu'on peut les faire varier au 1/5 de cet effort, soit à 14 kilogrammes par millimètre carré pour un câble de 36 fils, en 6 torons de 6 fils, on a :

$$36 \frac{\pi\delta^2}{4} 14 = P, \quad \text{d'où} \quad \delta = 0,05 \sqrt{P}.$$

δ diamètre des fils de fer, en millimètres ;
P charge que doit supporter le câble ;
d diamètre du cercle circonscrit au câble, en millimètres.

Si les contacts entre les fils et les torons étaient géométriques, on aurait $d = 9\delta$; mais à cause des petits vides qu'on ne peut éviter, on a $d = 10\delta$, et par suite

$$d = 0,5 \sqrt{P}.$$

A charge égale, le diamètre d est à peu près moitié pour les câbles métalliques que pour ceux en chanvre (73).

La galvanisation augmente le prix de 20 fr. par 100 kilog.

Cordes rondes ou plates (1re *qualité*).

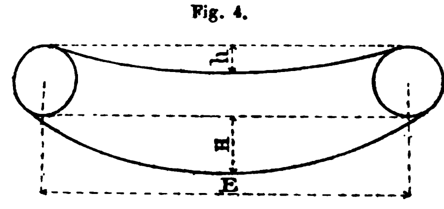
	Prix du kil.
Corde plate en aloès goudronné.	1f,20
— en chanvre goudronné.	1 ,25
Corde ronde en chanvre goudronné.	1 ,20
— — blanc.	1 ,45
— — et fil de fer.	1 ,25
— en fil de fer recouvert de chanvre.	1 ,30
Câbles plats ou ronds en fil d'acier anglais, 3 fr. à.	3 ,50
— — en manganèse, 2f,50 à.	3 ,00

Les câbles en fil d'acier, pour extraire la même charge, peuvent peser un tiers en moins par mètre courant que les câbles en fil de fer.

Les cordes en chanvre ou en aloès, pour extraire la même charge, devront peser un tiers en plus par mètre courant que les cordes en fil de fer.

71. Calcul des câbles métalliques dits « télédynamiques » (*fig.* 4). Le mode de transmission par câbles métalliques repose sur les mêmes principes que la transmission par courroie. On réalise les conditions du problème en donnant au câble une vitesse et une portée telles que le poids seul du câble et la courbure qu'il prend suffisent à lui faire acquérir la tension nécessaire à cette vitesse et au travail à transmettre.

Fig. 4.



Si l'on désigne par

Q l'effort tangentiel à transmettre ;
T la tension du brin conducteur ;
t la tension du brin conduit ;
$e = 2{,}718$ la base du système de logarithmes népériens,

ces quantités sont reliées par les relations des nᵒˢ 65 et 66, savoir :

$$T - t = Q$$

$$t = \frac{Q}{e^{\frac{fs}{r}} - 1}$$

$$T = \frac{e^{\frac{fs}{r}} Q}{e^{\frac{fs}{r}} - 1}.$$

Mais pour tenir compte du frottement des tourillons des poulies sur lesquelles le câble s'enroule, il faut faire usage des formules suivantes :

$$t = \frac{Q}{e^{\frac{fs}{r}}(1 - B) - (1 + B)}$$

$$T = \frac{e^{\frac{fs}{r}} Q}{e^{\frac{fs}{r}}(1 - B) - (1 + B)}$$

dans lesquelles :

$$B = \frac{fd}{2R}.$$

d est le diamètre des tourillons ;
R = le rayon des poulies.

En appliquant ces formules à des câbles télédynamiques pour lesquels

$s = \pi$, ou la demi-circonférence, et en prenant $f = 0{,}24$, Reuleaux trouve :

$$\frac{t}{Q} = 0{,}97\,;\quad \frac{T}{Q} = 2{,}02\,;\quad \frac{t}{T} = 0{,}48,$$

que l'on peut remplacer par les valeurs :

$$\frac{t}{Q} = 1;\quad \frac{T}{Q} = 2;\quad \frac{t}{T} = 0{,}5.$$

Telles sont les tensions les plus faibles t et T que le câble doit présenter pour qu'on soit assuré de la transmission de l'effort tangentiel Q à la poulie au moyen du câble.

Si le câble est formé d'un nombre de fils métalliques égal à i d'un diamètre δ, on déterminera le diamètre de ses fils par la formule suivante :

$$\frac{\pi\delta^2}{4} i \cdot R_1 = 2Q = T,$$

dans laquelle $\frac{\pi\delta^2}{4}$ est la section en millimètres carrés d'un fil métallique et R_1 le coefficient de sécurité ou de travail des fils par millimètre carré. Ce coefficient pourra être pris égal à 5, 6 ou 7 kilogrammes, ou même plus, suivant la qualité des fils métalliques.

De la formule précédente, on déduit :

$$\delta = 1{,}6\sqrt{\frac{Q}{i \cdot R_1}}. \qquad \text{(A)}$$

Si la vitesse du câble est v et si N est le nombre de chevaux transmis par le câble, l'effort tangentiel étant d'ailleurs, Q on a, pour l'expression du travail en kilogrammètres :

$$Qv = N \cdot 75,$$

d'où

$$Q = \frac{75N}{v},$$

par suite l'expression (A) devient :

$$\delta = 13{,}86\sqrt{\frac{N}{i \cdot R_1 v}}. \qquad \text{(B)}$$

Enfin, pour proportionner le diamètre des fils au diamètre des poulies, il faut, d'après Reuleaux, que le rapport du rayon R des poulies au diamètre des fils métalliques ne soit pas inférieur à une certaine limite et qu'on ait :

$$\frac{R}{\delta} > \frac{10.000}{18 - R_1},$$

R_1 étant le coefficient de sécurité ou de traction par millimètre carré de la section d'un fil métallique.

Relation empirique entre le nombre des fils, le diamètre extérieur c *du câble et le diamètre* δ des fils du câble :

$$\frac{c}{\delta} = \frac{i}{6} + 2.$$

Pour $i = 36, 48, 54, 60, 66, 72$:

$$\frac{c}{\delta} = 8.\ 10{,}2.\ 11{,}8.\ 12{,}8.\ 13{,}25.\ 14.$$

Application des formules précédentes. Admettons qu'il s'agisse de transmettre au moyen d'un câble télédynamique, enroulé sur des poulies, une puissance de 100 chevaux et de calculer les principaux éléments de la transmission.

On procédera par tâtonnement.

Adoptons pour les poulies un diamètre de 3 mètres et 30 mètres pour la vitesse du câble. La puissance de 100 chevaux à raison de 75 kilogrammètres par cheval donne 7500 kilogrammètres.

La vitesse de 30 mètres du câble répond à un effort tangentiel appliqué à la circonférence de la poulie de :

$$\frac{7500}{30} = 250 \text{ kilogr.}$$

Cet effort permettra de déterminer le diamètre des fils du câble. A cet effet, admettons 48 fils pour ce câble. Le diamètre des fils aura pour valeur, en prenant le coefficient de sécurité ou de traction des fils égal à 6 *kilogrammes* par millimètre carré :

$$\delta = 1{,}6\sqrt{\frac{Q}{48 \times 6}},$$

d'où

$$\delta = 1^{mm}{,}5.$$

On vérifiera ce diamètre par la relation :

$$\frac{R}{\delta} \geq \frac{10.000}{18 - 6}$$

ou

$$\frac{1^{m}{,}50}{0^{m}{,}0015} = 1.000 > 833.$$

72. Calcul de la longueur du câble. La courbe affectée par le câble sous l'action de son poids est celle de la chaînette.

Les câbles télédynamiques présentent des flèches faibles par rapport à leur portée; par suite, on peut, sans erreur sensible, remplacer la chaînette par la parabole qu'il est facile de construire au moyen de son sommet et des deux points de passage de la courbe sur les poulies. On

calcule les éléments de cette parabole par les formules suivantes :

$$p = 0{,}0075 i d^2 = \text{poids du câble par mètre.}$$

$$h = \frac{p \cdot E^2}{8t}$$

$$H = \frac{p \cdot E^2}{8T}$$

$$h_1 = 1{,}5H = 0{,}75h,$$

dans lesquelles E est la distance des points de contact de la parabole avec les poulies (Comme approximation, on peut prendre pour cette distance l'écartement des deux axes) :

h = flèche du brin conduit ;
H = flèche du brin conducteur ;
h_1 = flèche commune à l'état de repos.

Le tracé étant fait à une grande échelle, on pourra mesurer approximativement la longueur du câble que l'on peut d'ailleurs calculer au moyen de la rectification de la parabole (*Int.* 1807).

Autre exemple. — Établissement d'un câble télédynamique polygonal dans les usines de MM. Darblay, sur l'Essonne, par MM. Ch. Callon et Léon Vigreux.

Il s'agissait de transmettre la puissance de 40 chevaux d'un récepteur hydraulique à une usine établie à environ 700 mètres. Le câble devait réunir deux arbres horizontaux faisant en projection horizontale un petit angle de 8°10′ et dont la différence de niveau était de $4^m{,}500$. Ces ingénieurs ont adopté pour projection du câble un polygone dont les angles intérieurs étaient de 78°50′.

Ce câble se composait de sept travées égales, de chacune $87^m{,}91$, plus d'une travée finale de 90 mètres : la pente des côtés étant de 8 millimètres environ par mètre.

La poulie menante et la poulie menée ont été calées sur les arbres horizontaux établis aux deux extrémités de la ligne et, en outre, des galets intermédiaires ou de support ont été placés aux sommets du polygone.

Le diamètre des poulies de départ et d'arrivée était de $2^m{,}40$ et le nombre de tours par minute de ces poulies était de 150. Ce qui donne pour la vitesse du câble par seconde $18^m{,}85$.

Le travail à transmettre étant de 40 chevaux ou de

$$40 \times 75 = 3\,000 \text{ kilogrammètres,}$$

il en résulte que la force tangentielle à transmettre par le câble est de :

$$Q = \frac{3000}{18^m{,}85} = 160 \text{ kilogr.}$$

En désignant par T la traction du brin menant du câble et par t celle du brin mené, on sait qu'on a la relation (66)

$$T = Q + t.$$

Pour déterminer Q, ces ingénieurs ont fait usage de la formule pratique suivante (qui convient pour un arc de 180 degrés embrassé par le câble) :

$$Q = 0,8t\,(e^{f\pi} - 1),$$

en prenant $f = 0,28$ pour le coefficient de frottement du câble sur la poulie, on obtient :

$$Q = 1,128\,t = 160 \text{ kilogr.},$$

d'où

$$t = \frac{160}{1,128} = 142 \text{ kilogr.},$$

par suite

$$T = Q + t = 302 \text{ kilogr.}$$

Le câble était formé par un seul fil métallique et en appliquant un coefficient de sécurité ou de traction de 5 kilogrammes par millimètre carré, on a été conduit à adopter pour ce fil métallique une section de 60 millimètres carrés répondant à un diamètre de 0m,0085.

Dans cette installation, le travail des frottements a été de 6 chevaux 8/10, c'est-à-dire le 1/6 de la puissance à transmettre, qui était de 40 chevaux.

Dans une telle transmission, lors du montage, il faut avoir soin que le plan dans lequel tourne chaque galet intermédiaire contienne les tangentes au premier élément des deux courbes affectées, à droite et à gauche dudit galet, par le brin du câble que supporte ce galet. L'axe du galet doit être perpendiculaire au plan de ces deux tangentes.

73. Transmissions par câbles en chanvre. Les transmissions de *mouvement*, avec des câbles en chanvre, se répandent de plus en plus, grâce à leurs nombreux avantages sur les transmissions par engrenages ou par courroies, surtout lorsqu'il s'agit de grandes puissances. Elles sont aussi bien applicables pour les petites et moyennes forces que pour les grandes. Voici, à ce sujet, des données pratiques publiées par M. Jean-Jacques Wolff, fabricant de cordes à Mannheim, et reproduites dans le journal *la Papeterie*, d'après les résultats de ses nombreuses expériences sur des transmissions avec des cordes en chanvre de Manille et en chanvre du pays de Bade, dont la résistance à la rupture varie de 7 à 900 kilogrammes par centimètre carré de section, et avec des cordes en fils de coton, fins et souples, offrant la même résistance.

Le diamètre des poulies peut être réduit à 0m,50 pour les petites forces.

Le diamètre le plus convenable du câble est 0m,050 pour des poulies ayant au moins un mètre de diamètre, 0m,045 pour des poulies de 0m,70 à 1 mètre, 0m,040 pour des poulies de 0m,50 à 0m,70.

La vitesse du câble peut varier de 10 à 20 mètres.

L'effort transmis ne doit pas dépasser 5 kilogrammes par centimètre carré de section, la tension maximum du câble ne sera alors que de 10 kilogrammes, soit environ 1/80 de l'effort de rupture afin d'éviter tout allongement du câble.

Le plus grand effort à transmettre par une corde sera donc de :

100 ^{kg} pour celle de	$5^{cm},0$ de diamètre,	ayant	$19^{cm^2},61$ de section.		
80	—	$4^{cm},5$	—	$15^{cm^2},90$	—
63	—	$4^{cm},0$	—	$12^{cm^2},56$	—

Il sera facile de déterminer, d'après cela, le nombre de cordes nécessaire pour transmettre une force donnée à une vitesse imposée.

Exemple : soit à transmettre 140 chevaux d'un arbre à un autre, la vitesse linéaire du câble étant 18 mètres par seconde. L'effort à transmettre sera de :

$$\frac{140 \text{ ch.} \times 75^{kgm}}{18^m} = 583 \text{ kilogr.}$$

demandant une section totale de $\frac{583^{kg}}{5} = 116,5$ centimètres carrés que fourniront six cordes, de 5 centimètres de grosseur et $19^{cm^2},63$ de section, ou huit cordes de 4,5, dont la section totale serait $8 \times 15,90 = 127$ centimètres carrés.

On ne devra pas employer moins de deux câbles pour des transmissions supérieures à 10 chevaux et pour prendre le cas d'une vitesse moyenne de 15 mètres à la seconde :

2 câbles de 5	centimètres pour	15	chevaux.
3	—	30	—
4	—	50	—
6	—	100	—
10	—	200	—

Jusqu'à 10 chevaux à transmettre, les diamètres du câble unique et ceux des poulies sont résumés dans le tableau suivant :

FORCE en chevaux.	DIAMÈTRE des câbles.	DIAMÈTRE des poulies les plus convenables pour les diamètres des câbles.	POIDS PAR MÈTRE COURANT.	
			Chanvre de Manille.	Chanvre de Bade.
	millim.	millim.	kilogr.	kilogr.
1-2	25	400	0,450	0,500
2-3	30	500	0,600	0,710
3-5	35	600-700	0,750-0,900	0,920-1,000
5-8	40	700-800	1,000-1,200	1,160-1,250
10	45	800-1.000	1,230-1,500	1,410-1,800

Les câbles, pour bien fonctionner, doivent être bien montés. Leur montage, comprenant spécialement l'exécution de la jonction des deux bouts ou l'épissure, doit être fait par des mains exercées, car du bon montage dépend leur bon fonctionnement, tandis que leur durée dépend surtout de leur bonne confection.

M. Wolff cite comme exemples à l'appui des règles pratiques qu'il donne : une transmission par cordes de la force de 250 chevaux, fonctionnant depuis quatre ans et demi et dont les câbles ne présentaient encore aucune trace d'usure; une autre de 100 chevaux, avec des poulies de 3 mètres et 1^{m},200 de diamètre, écartées de 4^{m},150 d'axe en axe, et fonctionnant depuis plusieurs années sans interruption, sans réparation, et dont les câbles n'ont exigé aucun raccourcissement.

MACHINES SIMPLES

74. Levier (*Int.* 1561 et suiv.). La perpendiculaire O*a*, abaissée d'un point O sur la direction d'une force P, est le *bras de levier* de cette force par rapport à ce point.

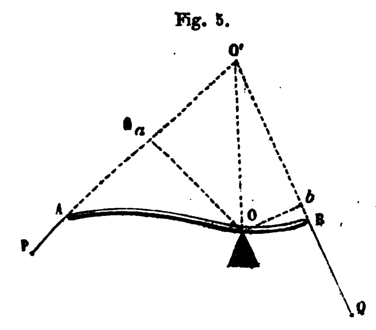


Fig. 5.

Le produit P × O*a* de la force par son bras de levier est le *moment* de la force.

Le bras de levier d'une force par rapport à une droite est la perpendiculaire commune à la droite et à la direction de la force.

Le moment de la force par rapport à cette droite, appelée *axe des moments*, est le produit de la force par son bras de levier. Cette définition suppose la force située dans un plan normal à l'axe; s'il n'en était pas ainsi, son moment serait le produit de son bras de levier par la projection de la force sur un plan perpendiculaire à l'axe.

Lorsque toutes les forces qui sollicitent un corps solide, qui ne peut que tourner autour d'un de ses points, sont situées dans un même plan avec ce point, il ne peut y avoir mouvement autour du point que dans le plan des forces. Un tel système constitue un *levier* qui n'est ordinairement, dans la pratique, qu'une tige rigide mobile autour d'un petit axe, qui est perpendiculaire au plan du mouvement et que l'on suppose réduit au point où il rencontre ce plan.

Un levier est sollicité par des forces qui tendent, les unes à produire l'oscillation, et les autres à s'y opposer en agissant en sens contraire. Les premières de ces forces sont les *puissances* et les secondes les *résistances*.

Pour qu'un levier AB sollicité par une puissance P et une résistance Q soit en équilibre, on doit avoir, en négligeant le frottement de l'axe,

$$P : Q = Ob : Oa, \quad \text{d'où} \quad P \times Oa = Q \times Ob;$$

c'est-à-dire que les forces sont en raison inverse de leurs bras de levier, ou encore le moment de la puissance est égal au moment de la résistance.

L'équation précédente permet de calculer une des quatre quantités P, Q, Oa et Ob, les trois autres étant données. Pour $P = 65^k$, $Oa = 2^m$ et $Ob = 1^m,10$, on a :

$$Q = P \times \frac{Oa}{Ob} = 65 \times \frac{2}{1,10} = 118^k,18.$$

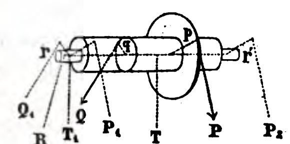
La pression sur le point d'appui O, abstraction faite du poids du levier, est égale à la résultante des deux forces P et Q.

Un levier est dit de *premier genre* quand le point d'appui O est entre les points d'application de la puissance et de la résistance (*fig.* 5), et il est dit du *deuxième* ou du *troisième genre*, selon que le point d'application de la résistance est entre celui de la puissance et le point d'appui, ou que le point d'application de la puissance est entre celui de la résistance et le point d'appui.

Voir *Int.* 1688 et suivants, pour la description et l'équilibre des machines à peser les corps.

75. **Treuil** (*Int.* 1702). En négligeant les frottements des tourillons du treuil, on a, pour l'équilibre dynamique,

Fig. 6.



$$P \times 2\pi p = Q \times 2\pi q, \quad \text{d'où} \quad Pp = Qq.$$

P puissance ou force motrice agissant dans un plan normal à l'axe du treuil;
p bras de levier de P par rapport à l'axe du treuil;
Q résistance vaincue agissant dans un plan normal à l'axe du treuil;
q bras de levier de Q par rapport à l'axe du treuil.

Les forces P et Q peuvent ne pas être parallèles entre elles.

Comme on le voit, les conditions d'équilibre du treuil sont les mêmes que pour le levier (74).

76. En tenant compte du frottement des tourillons du treuil, la formule précédente devient (*Int.* 1702) :

$$Pp = Qq + fRr + fR'r'.$$

f' coefficient de frottement des tourillons sur leurs coussinets (59 et 60);
r et r' rayons des tourillons;
R et R' résultantes des composantes des trois forces : le poids du treuil, et la puissance P et la résistance Q, décomposées chacune en deux autres agissant dans des plans normaux à l'axe, au milieu de la longueur des tourillons r et r' (*Int.* 1517, 1528, 1544);
fRr et $fR'r'$ moments des frottements des tourillons.

Comme R et R' dépendent de Q, on résoudra l'équation précédente par tâtonnement : on déterminera d'abord Q en négligeant le frottement des tourillons (75); ayant Q, on déterminera les valeurs correspondantes de R et R' par les décompositions indiquées plus haut et figure 6; ces valeurs, substituées dans l'équation précédente, donneront une deuxième valeur de Q plus rapprochée que la première. Opérant sur cette seconde valeur de Q comme pour la première, on obtiendra une troisième valeur approchant encore plus du résultat, et en continuant ainsi de suite, on

obtiendra pour Q une valeur aussi approchée qu'on voudra. Dans la pratique, on pourra généralement considérer la deuxième valeur de Q comme suffisamment approchée de la valeur réelle.

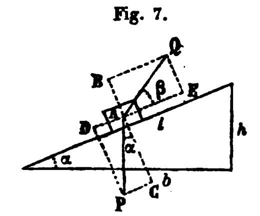
77. Cabestan (*Int.* 1703). Si, outre les forces P et Q qui sollicitent le treuil en agissant dans les plans normaux à son axe, une force F agit parallèlement à cet axe, comme cela arrive dans les cabestans, qui ne sont autre chose que des treuils à axe vertical, dont le poids, au lieu de se reporter sur le contour des tourillons, agit sur la face horizontale du pivot inférieur, la formule posée pour le treuil (76) devient :

$$Pp = Qq + fRr + fR'r' + f'F\frac{2}{3}r''.$$

$f'F\frac{2}{3}r''$ moment du frottement de la face horizontale du pivot (60);
f' coefficient de frottement qui peut être différent de celui du pourtour du pivot;
r'' rayon de la surface frottante horizontale du pivot.

78. Plan incliné (*Int.* 1704).

Fig. 7.



Le corps glissant par son propre poids, pour qu'il y ait équilibre dynamique, on doit avoir

$$P\sin\alpha = fP\cos\alpha, \quad \text{d'où} \quad f = \frac{\sin\alpha}{\cos\alpha} = \text{tang}\,\alpha.$$

P poids du mobile;
α angle que fait le plan incliné avec l'horizon;
f coefficient de frottement (56).

Ainsi, il y aura équilibre dynamique lorsque la tangente de l'angle d'inclinaison du plan à l'horizon sera égale au coefficient de frottement f.

De là résulte un moyen de déterminer le coefficient de frottement de deux corps. Formant le plan incliné avec l'un des corps, et le mobile avec l'autre, puis inclinant doucement le plan jusqu'à ce que le mobile soit prêt à se mettre en mouvement, c'est-à-dire jusqu'au point où le mobile conserve le léger mouvement qu'on lui imprime; à cet instant, le mobile est en équilibre dynamique, et la tangente de l'angle α que fait le plan avec l'horizon est égale au coefficient de frottement f.

Ayant trouvé $\alpha = 12°25'$, on a (*Int.* 1094), $\text{tang}\,\alpha = f = 0{,}22$, valeur donnée par le bronze glissant sur la fonte sans enduit (57).

Pour $f = 0{,}08$, on a $\text{tang}\,\alpha = 0{,}08$, et par suite $\alpha = 4°35'$.

Si le mobile est sollicité non seulement par son poids et le frottement, mais aussi par une ou plusieurs autres forces dont la résistance Q *agit dans le plan vertical* PAE *passant par le centre de gravité du corps et la ligne de plus grande pente du plan incliné*, pour qu'il y ait équilibre dynamique, on doit avoir :

$$P\sin\alpha = Q\cos\beta + f(P\cos\alpha - Q\sin\beta), \quad \text{d'où} \quad Q = P\,\frac{\sin\alpha - f\cos\alpha}{\cos\beta - f\sin\beta}. \qquad (1)$$

β angle que fait la force Q avec AE, la ligne de plus grande pente. Il faut donner à $\cos\beta$ un signe négatif quand l'angle β est plus grand qu'un droit (*Int.* 1049).

Si le mobile montait le plan incliné au lieu de le descendre, on aurait, pour l'équilibre dynamique :

$$Q\cos\beta = P\sin\alpha + f(P\cos\alpha - Q\sin\beta),\ \text{d'où}\ Q = P\,\frac{\sin\alpha + f\cos\alpha}{\cos\beta + f\sin\beta}.$$

Si la force Q, au lieu d'agir de manière à tendre à soulever le mobile de dessus le plan incliné, comme nous l'avons supposé dans les deux formules précédentes et dans la figure, *agissait en dessous de* DE *de manière à presser le mobile sur le plan*, il suffirait simplement de remplacer le signe — de $Q\sin\beta$ par le signe + dans les deux formules précédentes.

Dans le cas où l'angle α *est nul, c'est-à-dire quand le plan est horizontal*, on a $\sin\alpha = 0$ et $\cos\alpha = 1$, $Q\cos\beta$ est seul puissance, et l'équation d'équilibre dynamique est :

$$Q\cos\beta = f(P \pm Q\sin\beta)\quad \text{d'où}\quad Q = \frac{f}{\cos\beta \pm f\sin\beta}.$$

Si l'angle β *était nul, c'est-à-dire si* Q *agissait parallèlement au plan incliné*, on aurait $\sin\beta = 0$, $\cos\beta = \pm 1$, et l'équation (1) deviendrait :

$$P\sin\alpha = \pm Q + fP\cos\alpha.$$

Enfin, si à la fois les angles α et β *étaient nuls*, on aurait, pour l'équilibre dynamique,

$$Q = fP. \qquad (56)$$

qui est l'expression du frottement sur un plan horizontal.

79. Équilibre dynamique de la presse à coin (*Int.* 1706).

Fig. 8.

Pour l'équilibre dynamique, on doit avoir :

$$P = \frac{2(1 + f\,\mathrm{tang}\,\alpha)}{\mathrm{tang}\,\alpha - 2f - f^2\,\mathrm{tang}\,\alpha}\,Q. \qquad (a)$$

P force motrice agissant normalement à la tête du coin;
Q résistance utile qu'oppose la matière à comprimer;
α angle que fait la tête du coin avec chacune des faces travaillantes;
f coefficient de frottement (56), qu'on suppose être le même pour les deux faces travaillantes du coin et pour le bloc interposé entre le coin et la matière sur son support.

Pour $Q = 1000$ kil., $\alpha = 87°\,10'$, d'où (*Int.* 1094) $\mathrm{tang}\,\alpha = 20{,}205$ ou sensiblement 20,2, et $f = 0{,}16$, qui convient au chêne frotté de savon sec glissant sur chêne, les fibres étant parallèles (57), l'équation précédente donne :

$$P = \frac{2(1 + 0{,}16 \times 20{,}2)}{20{,}2 - 2\times 0{,}16 - 0{,}16 \times 0{,}16 \times 20{,}2} \times 1000 = 0{,}437 \times 1000 = 437^{k}.$$

Telle est la relation qui doit exister entre la puissance P et la résistance utile Q pour qu'il y ait équilibre dynamique, c'est-à-dire pour que le moindre effort mette la presse en mouvement, et que ce mouvement se conserve uniforme quand cet effort additionnel cesse son action. Il est évident qu'un tel mouvement ne peut se réaliser qu'autant que la résistance Q reste constante, ce qui n'a pas lieu quand on comprime des matières; mais, dans toutes les positions, les valeurs de P et Q sont liées par la relation précédente.

L'application qui vient d'être faite montre que la presse à coin est peu avantageuse pour obtenir de grandes compressions, et qu'il ne convient guère de l'employer quand la force motrice n'est qu'une simple pression, et non le résultat d'un choc.

Relation entre le travail moteur et le travail utile résistant. Pour un abaissement e du coin, le bloc comprimant avançant de $2e'$, les travaux moteurs et utiles sont :

$$P \times e \quad \text{et} \quad Q \times 2e'.$$

On a (*Int.* 1078) :

$$e = e' \tang \alpha. \qquad (b)$$

Multipliant membre à membre les équations (a) et (b), on obtient :

$$Pe = \frac{\tang \alpha + f \tang^2\alpha}{\tang \alpha - 2f - f^2 \tang \alpha} Q \times 2e', \qquad (c)$$

formule donnant le travail moteur Pe en fonction du travail utile $Q \times 2e'$.

80. Équilibre dynamique de la presse à vis à filets carrés (*Int.* 1707). Appelant :

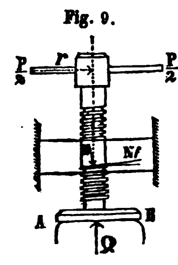


Fig. 9.

P la puissance agissant dans un plan perpendiculaire à l'axe; la force P est supposée répartie uniformément autour de l'axe de la vis, afin qu'elle ne fasse naître aucune pression contre la surface latérale des filets ; ainsi elle est composée, par exemple, de deux forces $\frac{1}{2}$P formant un couple dont le bras de levier est divisé en deux parties égales par l'axe (*Int.* 1547) ;

r le bras de levier de la puissance P ;

r' le rayon moyen de la surface hélicoïdale en contact ; ordinairement la section des filets est un carré ;

r'' le rayon de la surface par laquelle le bout de la vis frotte sur AB ;

α l'angle que fait l'hélice moyenne, ou mieux la tangente à cette hélice, avec le plan perpendiculaire à l'axe ;

h le pas de l'hélice (*Int.* 1259); c'est l'espace parcouru suivant l'axe de la vis pour une révolution de cette vis; si la vis est à un simple filet, h est la distance d'axe en axe de 2 filets consécutifs, et suivant que la vis est à 2 ou 3 filets, h est égale à 2 ou 3 fois cette distance; h est toujours la distance d'axe en axe de 2 filets consécutifs pris sur la même spire ;

f le coefficient de frottement (56), qu'on suppose être le même pour les filets et le bout de la vis ;

Q la résistance utile que la matière oppose au mouvement de translation de la vis; elle agit suivant l'axe de la vis,

on a, pour l'équilibre dynamique :

$$P = Q\left(\frac{r'}{r} \times \frac{\tang \alpha + f}{1 - f \tang \alpha} + \frac{2}{3} f \frac{r''}{r}\right) \qquad (a)$$

ou, en remplaçant tang α par son égal $\frac{h}{2\pi r'}$:

$$P = Q\left(\frac{r'}{r} \times \frac{h + 2\pi r' f}{2\pi r' - fh} + \frac{2}{3} f \frac{r''}{r}\right). \qquad (b)$$

Dans le cas où l'on néglige le frottement du bout de la vis sur la surface AB, ces formules deviennent respectivement :

$$P = Q\frac{r'}{r} \times \frac{\tang \alpha + f}{1 - f \tang \alpha}, \quad \text{et} \quad P = Q\frac{r'}{r} \times \frac{h + 2\pi r' f}{2\pi r' - fh}.$$

Application. Pour $Q = 9000$ kil., $r = 1^m,00$, $r' = 0^m,034$, $r'' = 0^m,025$, $h = 0^m,016$ et $f = 0,08$, la formule (*b*) donne :

$$P = 9000\,(0,005\,299 + 0,001\,333) = 59^k,69.$$

Quand on ne tient pas compte du frottement du bout de la vis, on a :

$$P = 9000 \times 0,005\,299 = 47^k,69.$$

Ce qui montre que ce frottement n'est pas négligeable.

81. Équilibre dynamique de la presse à vis à filets triangulaires (*Int.* 1708). Le plan méridien passant par l'axe de la vis coupe le filet suivant un triangle isocèle. Désignant dans ce triangle chacun des côtés égaux par a, la hauteur, qui est la saillie du filet sur le corps de la vis, par s, et le demi-angle au sommet par β, on a $\cos \beta = \frac{s}{a}$, et représentant par m ce rapport $\frac{s}{a}$, les formules (*a*) et (*b*) du numéro précédent deviennent respectivement, en conservant aux lettres les mêmes significations :

$$P = Q\left(\frac{r'}{r} \times \frac{m \tang \alpha + f}{m - f \tang \alpha} + \frac{2}{3} f \frac{r''}{r}\right),$$

et

$$P = Q\left(\frac{r'}{r} \times \frac{mh + 2\pi r' f}{2\pi r' m - fh} + \frac{2}{3} f \frac{r''}{r}\right).$$

Pour les vis en chêne, orme, etc., l'angle β est égal à 45°, d'où $\cos \beta = \frac{s}{a} = m = 0,707$; pour celles en bois plus durs, comme le buis, le cormier, le sorbier, etc., et pour celles en fer, on fait $\beta = 30°$, d'où $m = 0,866$.

Pour $\beta = 30°$, l'application du numéro précédent donne $P = 63^k,55$.

Pour les vis à filets carrés, $\beta = 0$, $\cos \beta = m = 1$, et faisant $m = 1$ dans les formules précédentes, elles deviennent bien celles du n° 80.

82. Frottement des engrenages. Lorsqu'un corps se meut en roulant et glissant à la fois sur un autre corps, on admet que le travail total absorbé par les deux frottements est le même que si un simple frottement de glissement avait lieu sur la différence des chemins parcourus réciproquement par une surface sur l'autre, et un simple frottement de roulement sur le plus petit des chemins parcourus (*Int.* 1709). Dans les engrenages, les deux mouvements de roulement et de glissement sont réunis, et l'on trouve, en négligeant le frottement de roulement, qui est toujours très faible (*Int.* 1710) :

$$\mathcal{T}_m = \mathcal{T}_u + \mathcal{T}_u \times \frac{fa}{2}\left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r'}\right). \qquad (1)$$

$\mathcal{T}_m$ travail moteur dépensé par la roue qui conduit ;
$\mathcal{T}_u$ travail utile dont on peut disposer sur l'arbre de la roue conduite ;
$\mathcal{T}_u \times \frac{fa}{2}\left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r'}\right)$ travail absorbé dans le frottement ;
f coefficient de frottement, variable suivant la nature des dents et la manière dont elles sont graissées (57) ;
a pas de l'engrenage ; c'est la distance d'axe en axe de deux dents consécutives, prise sur la circonférence primitive ;
r et r' rayons des circonférences primitives ou de contact des deux roues.

La formule précédente fait voir que pour des roues de rayons donnés, le travail absorbé par le frottement est proportionnel au pas a, qu'il faut par conséquent prendre le plus petit possible. La même formule montre aussi que pour les mêmes valeurs de a, r et r', le rapport entre le travail moteur et le travail utile est le même, quelle que soit la roue qui commande l'autre. Enfin, d'après la même formule, le travail absorbé par le frottement étant proportionnel à $\frac{1}{r} + \frac{1}{r'}$, c'est-à-dire à $\frac{r + r'}{rr'}$, comme cette quantité est d'autant plus petite, pour une même valeur de $r + r'$, que le produit rr' est plus grand, et ce produit augmentant à mesure que r diffère moins de r' (*Int.* 549), le travail absorbé par le frottement est donc d'autant plus petit, pour une même valeur de $r + r'$, que r diffère moins de r', et il est minimum quand $r = r'$.

Pour les engrenages cylindriques, on peut mettre la formule précédente sous la forme plus commode :

$$\mathcal{T}_m = \mathcal{T}_u + \mathcal{T}_u f\pi \left(\frac{1}{n} + \frac{1}{n'}\right). \qquad (2)$$

n et n' nombres de dents contenus dans les engrenages.

Application. On a $\mathcal{T}_m = 200^{km}$ par seconde ; la roue motrice a 100 dents et le pignon 21, le graissage des dents est bien fait et donne $f = 0{,}08$; il s'agit de déterminer le travail utile $\mathcal{T}_u$ que pourra transmettre l'arbre du pignon dans une seconde.

Remplaçant les lettres par leurs valeurs dans la dernière expression de $\mathcal{T}_m$, on a :

$$300 = \mathcal{T}_u + \mathcal{T}_u \times 0{,}08 \times 3{,}14 \left(\frac{1}{100} + \frac{1}{21}\right),$$

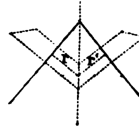
d'où l'on tire : $$\mathcal{T}_u = \frac{300}{1+0{,}0145} = 295^{km}{,}71.$$

Le travail absorbé par le frottement en une seconde est :

$$\mathcal{T}_m - \mathcal{T}_u = 300 - 295{,}71 = 4^{km}{,}29.$$

83. Pour les engrenages coniques. a, r et r' étant le pas et les rayons moyens, mesurés par rapport au milieu de la longueur de la dent sur la génératrice de contact, appelant α l'angle que font entre eux les axes des engrenages, les formules (1) et (2) du numéro précédent deviennent respectivement :

Fig. 10.



$$\mathcal{T}_m = \mathcal{T}_u + \mathcal{T}_u \times \frac{fa}{2}\sqrt{\frac{1}{r^2} + \frac{1}{r'^2} + \frac{2\cos\alpha}{rr'}},$$

$$\mathcal{T}_m = \mathcal{T}_u + \mathcal{T}_u \times f\pi\sqrt{\frac{1}{n^2} + \frac{1}{n'^2} + \frac{2\cos\alpha}{nn'}}.$$

Ces formules font voir que le travail absorbé par le frottement augmente depuis $\alpha = 180°$, ce qui correspond aux engrenages cylindriques intérieurs, pour lesquels il est le plus petit, jusqu'à $\alpha = 0$, ce qui correspond aux engrenages cylindriques extérieurs, pour lesquels il est le plus grand. Pour $\alpha = 0$, ces formules reviennent à celles du numéro précédent, comme cela devait être.

84. Pour une crémaillère commandée par une roue d'engrenage ou commandant une roue d'engrenage, on a (*Int.* 1713) :

$$\mathcal{T}_m = \mathcal{T}_u + \mathcal{T}_u \frac{fa}{2} \times \frac{1}{r}.$$

a pas de l'engrenage et de la crémaillère ;
r rayon de la circonférence primitive de l'engrenage.

85. Suivant que les engrenages métalliques sont exécutés avec plus ou moins de soin, l'intervalle entre deux dents consécutives est égal à l'épaisseur de la dent, augmentée de 1/20 à 1/10 de cette épaisseur, c'est-à-dire qu'il y a de 1/20 à 1/10 de jeu entre les dents engrenées; ce jeu varie de 1/10 à 1/6 pour les engrenages à dents de bois.

Pour rendre le frottement des engrenages le plus petit possible, on fait les surfaces de contact en épicycloïde ou en développante de cercle (*Int.* 1237, 1252); mais à cause des difficultés d'exécution, pour les engrenages ordinaires, on se contente d'arcs de cercle décrits avec le pas de l'engrenage pour rayon, et d'un centre pris sur la circonférence primitive, ou un peu plus rapproché de l'axe de la roue; des constructeurs prennent les 3/4 du pas pour rayon. Le reste des joues de chaque dent est un plan tangent à ces arcs et passant par le centre de la roue. C'est surtout pour les engrenages à grosses dents qu'il convient de recourir aux tracés en épicycloïde ou en développante; mais la développante de cercle donne des dents qui diminuent trop rapidement d'épaisseur lorsque le nombre des dents est inférieur à 30.

Pour les engrenages coniques, il faudrait prendre des développantes ou des épicycloïdes sphériques; mais on se contente également d'arcs de cercle. (Voir la résistance des matériaux pour les dimensions des différentes parties des roues d'engrenage.)

86. Travail absorbé par le frottement du bouton d'une manivelle. Pour obtenir ce travail, on développe la circonférence du bouton de la manivelle, et l'on élève aux différents points de ce développement, que l'on considère comme axe des abcisses, des perpendiculaires ou ordonnées représentant l'intensité du frottement correspondant à ces différents points; l'aire de la courbe ainsi obtenue, que l'on peut calculer à l'aide de la formule de Thomas Simpson ou de celle de Poncelet, représente le travail absorbé par le frottement pour une révolution (*Int.* 1498).

L'intensité du frottement correspondant à un point quelconque de l'axe des abcisses est représentée par le coefficient de frottement multiplié par la pression qu'exerce la bielle sur le bouton de la manivelle, au moment où son axe rencontre ce bouton au point considéré.

Si la bielle exerce un effort constant sur le bouton de la manivelle, le travail absorbé par le frottement est le même que pour un tourillon ordinaire (60), et, pour une révolution de la manivelle, on a :

$$\mathcal{T}_n = 2\pi r f \mathrm{P}.$$

$\mathcal{T}_n$ travail absorbé ;
r rayon du bouton de la manivelle ;
f coefficient de frottement ;
P pression constante de la bielle sur le bouton de la manivelle.

Cette formule fait voir que le travail absorbé est proportionnel au rayon r, qu'il faudra, par conséquent, prendre le plus petit possible. Aussi doit-on éviter l'emploi des *excentriques* pour la transmission des grands efforts, l'expression du travail absorbé par le frottement étant la même que pour le bouton d'une manivelle, et r étant très grand, puisque c'est le rayon de figure de l'excentrique.

87. Une *manivelle* peut être *à double effet* ou *à simple effet*. Dans le premier cas, qui est celui de la formule du nº 86, la force qui agit sur la bielle est dirigée dans un sens pendant la première moitié de la révolution de la manivelle, et dans l'autre sens pendant la seconde moitié. Dans le deuxième cas, la force n'agit que dans un sens et ne sollicite la manivelle que pendant la moitié de sa révolution; de telle sorte que le travail absorbé par le frottement, pour une révolution complète de la manivelle, n'est que

$$\pi r f \mathrm{P}.$$

88. Équilibre dynamique d'une manivelle à double effet. Cet équilibre ne peut être que périodique (45), et l'on doit avoir, pour une période ou un tour de manivelle, en négligeant les frottements (47) :

$$\mathrm{F} \times 4\mathrm{R} = \mathrm{Q} \times 2\pi r, \text{ d'où } \mathrm{F} = \frac{\pi}{2}\mathrm{Q}\frac{r}{\mathrm{R}} \text{ ou } \mathrm{Q} = \frac{2}{\pi}\mathrm{F}\frac{\mathrm{R}}{r}.$$

F force agissant suivant l'axe de la bielle, que l'on suppose assez long pour qu'on puisse le considérer comme restant toujours parallèle à lui-même, et négliger sa variation de direction ;
R rayon de la manivelle ;
4R espace parcouru par la puissance F pour un tour de manivelle, c'est-à-dire pour une allée et une venue de la bielle ;
$F \times 4R$ travail développé par la puissance F, aussi pour un tour de manivelle ou une allée et une venue de la bielle ;
Q résistance agissant sur l'arbre de la manivelle à l'extrémité d'un bras de levier constant r ;
$2\pi r$ chemin parcouru par la résistance Q, pour un tour de manivelle ;
$Q \times 2\pi r$ travail absorbé par la résistance Q, aussi pour un tour de manivelle.

Pendant chaque demi-révolution de la manivelle, le moment de la puissance F, par rapport à l'axe de la manivelle, varie pour toutes les positions de la bielle, et les valeurs minimum, moyenne et maximum de ce moment, valeurs qui sont les mêmes pour un tour entier de manivelle, sont respectivement :

$$F \times 0, \quad F \times \frac{2}{\pi} R, \quad F \times R;$$

quantités qui sont dans le rapport des nombres :

	0,	0,637	1,
ou	0,	1	1,57.

Ces nombres proportionnels font voir combien la marche d'une manivelle est irrégulière.

Les valeurs minimum et maximum du moment de F sont évidemment $F \times 0$ et $F \times R$. Quant à la valeur moyenne, comme elle est égale à Qr, remplaçant Q par sa valeur précédente en fonction de F, on a bien $F \times \frac{2}{\pi} R$ pour cette valeur moyenne.

89. Équilibre dynamique de deux manivelles à double effet montées à angle droit sur le même arbre. Chaque manivelle agit en particulier comme dans le cas précédent, et leur ensemble ne peut encore donner qu'un équilibre dynamique périodique, pour lequel on doit avoir, pour un tour des manivelles et en négligeant les frottements :

$$2F \times 4R = Q \times 2\pi r, \quad \text{d'où} \quad F = \frac{\pi}{4} Q \frac{r}{R} \quad \text{ou} \quad Q = \frac{4}{\pi} F \frac{R}{r}.$$

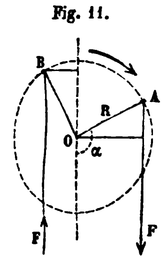
F force qui agit suivant l'axe de chacune des bielles ;
Q R et r ont les mêmes significations qu'au numéro précédent.

Les sommes de moments minimum, moyenne et maximum des forces F, pour une révolution des manivelles, sont successivement :

$$F \times R, \quad 2F \times \frac{2}{\pi} R, \quad 2F \times \frac{R}{\sqrt{2}};$$

valeurs qui sont dans le rapport des nombres :

	1,	1,274,	1,414,
ou	0,785,	1,	1,11.



Appelant α l'angle que fait l'une OA des manivelles avec la direction des bielles, la figure 11 montre que dans une position quelconque des manivelles, les forces F appliquées en A et B ont des moments exprimés respectivement par $FR \sin \alpha$ et $FR \cos \alpha$, et dont la somme est :

$$FR(\sin \alpha + \cos \alpha) = FR\sqrt{2} \sin(45^\circ + \alpha). \qquad (\textit{Int.}\ 1074)$$

La valeur minimum de cette somme correspondant à $\alpha = 0$, c'est-à-dire au point où l'une des manivelles est au point mort, et la valeur maximum à $\alpha = 45^\circ$, c'est-à-dire au point où les manivelles sont toutes deux inclinées à 45° sur la direction des bielles, ces valeurs sont :

$$FR\sqrt{2} \times \frac{1}{\sqrt{2}} = FR \quad \text{et} \quad FR\sqrt{2} \times 1 = 2F = \frac{R}{\sqrt{2}}.$$

Quant à la valeur moyenne de la somme des moments des deux forces F, comme elle est égale à Qr, remplaçant Q par sa valeur précédente en fonction de F, elle est $2F \times \frac{2}{\pi} R$.

90. Équilibre dynamique de trois manivelles à double effet montées sur le même arbre et faisant entre elles des angles égaux. Cet équilibre ne peut encore être que périodique, et l'on doit avoir, pour une période, en négligeant les frottements :

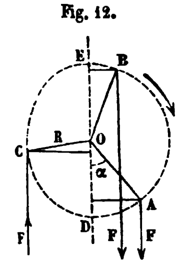
$$3F \times 4R = Q \times 2\pi r, \quad \text{d'où} \quad F = \frac{\pi}{6} Q \frac{r}{R} \quad \text{ou} \quad Q = \frac{6}{\pi} F \frac{R}{r}.$$

Les lettres ont la même signification que dans le cas précédent, et les sommes de moments minimum, moyenne et maximum des forces F, pour une révolution des manivelles, sont successivement :

$$FR\sqrt{3}, \quad 3F \frac{2}{\pi} R, \quad 2FR;$$

valeurs qui sont dans le rapport des nombres :

	1,73,	1,91,	2,
ou	0,905,	1,	1,046.



Appelant α l'angle que forme l'une OA des manivelles avec la direction DE des bielles, considérant les deux forces F appliquées aux points A et B situés du même côté de DE, leurs moments sont respectivement $FR \sin \alpha$ et $FR \sin(\alpha + 120^\circ)$, dont la somme est :

$$S = FR[\sin \alpha + \sin(\alpha + 120^\circ)].$$

Remarquant que :

$$\sin(\alpha + 120^\circ) = \sin \alpha \cos 120^\circ + \cos \alpha \sin 120, \qquad (\textit{Int.}\ 1067)$$

ou, puisque $\cos 120° = -\cos 60° = -\frac{1}{2}$, et $\sin 120° = \sin 60°$,

$$\sin(\alpha + 120°) = -\frac{1}{2}\sin\alpha + \cos\alpha \sin 60°,$$

on a donc :

$$S = FR\left(\frac{1}{2}\sin\alpha + \cos\alpha\sin 60°\right),$$

ou, en remplaçant $\frac{1}{2}$ par $\cos 60°$:

$$S = FR(\sin\alpha\cos 60° - \cos\alpha\sin 60°) = FR\sin(\alpha + 60°).$$

La somme des perpendiculaires abaissées des points A et B sur DE étant égale à la perpendiculaire abaissée du point C sur la même droite (*Int.* 957), la somme des moments des trois forces F agissant en A, B, C est égale à :

$$2S = 2FR\sin(\alpha + 60°).$$

Les valeurs minimum et maximum de cette somme correspondant à $\alpha = 0°$ et $\alpha = 30°$, elles sont bien, en remarquant que $\sin 60° = \frac{\sqrt{3}}{2}$ et $\sin 90° = 1$:

$$FR\sqrt{3} \quad \text{et} \quad 2FR.$$

Quant à la valeur moyenne de 2S, elle est égale à Qr, ou, en remplaçant Q par sa valeur précédente en fonction de F, à

$$3F\frac{2}{\pi}R.$$

En employant 5, 7, 11... manivelles convenablement disposées, on augmenterait encore la régularité du mouvement; mais les grandes difficultés d'ajustage et les complications du mécanisme font renoncer à l'emploi de plus de trois manivelles montées sur le même arbre.

91. **Équilibre dynamique d'une manivelle à simple effet** (87). Cet équilibre est encore périodique, et l'on doit avoir, pour une révolution complète de la manivelle, en négligeant les frottements :

$$F \times 2R = 2\pi r, \quad \text{d'où} \quad F = \pi Q\frac{r}{R} \quad \text{ou} \quad Q = \frac{1}{\pi}F\frac{R}{r}.$$

Cela suppose que la résistance Q agit, comme pour une manivelle à double effet, pendant la révolution complète.

Les moments minimum, moyen et maximum de la force, pour une révolution complète de la manivelle, sont successivement :

$$F \times 0, \quad F \times \frac{R}{\pi}, \quad F \times R;$$

valeurs qui sont dans le rapport des nombres :

$$0, \quad 0{,}318, \quad 1,$$

ou

$$0, \quad 1, \quad 3{,}14.$$

92. Bielle. Pour qu'une bielle transmette le plus convenablement possible à une manivelle l'effort qui la sollicite, il faut que sa longueur soit la plus grande possible; mais, afin ne pas être obligé de lui donner une section trop considérable, on se contente de faire sa longueur égale à 5 ou 6 fois le rayon de la manivelle.

93. Volants pour manivelles. Afin de rendre possible la marche d'une manivelle et de régulariser son mouvement, on fait usage d'un volant qui accumule l'excès du travail moteur sur le travail résistant quand ce premier est supérieur au second, pour le restituer quand le travail résistant devient supérieur au travail moteur (*Int.* 1637).

Pour une *manivelle à simple effet*, le poids du volant est donné par la formule :

$$PV^2 = 0{,}5511 \times F2R = gK, \qquad (a)$$

de laquelle on conclut :

$$P = \frac{24325n}{NV^2} K. \qquad (b)$$

Pour une *manivelle à double effet*, on a :

$$PV^2 = 0{,}2105 \times F2R \times gK, \qquad (c)$$

d'où:

$$P = \frac{4645n}{NV^2} K. \qquad (d)$$

P poids du volant ou plutôt de sa jante, car on néglige la régularité due aux bras et au moyeu dans l'établissement de ces formules ;
V vitesse moyenne de la jante du volant;
F force agissant suivant l'axe de la bielle;
R rayon de la manivelle ;
n puissance de la force F en chevaux ;
N nombre de tours du volant par minute ;
K coefficient de régularité du mouvement ; sa valeur dépend du genre de travail à produire.

Pour une manivelle à simple effet, on conclut (91):

$$n \times 75^{km} = \frac{F \times 2R}{60} N,$$

et pour une manivelle à double effet (88) :

$$n \times 75^{km} = \frac{F \times 4R}{60} N.$$

C'est à l'aide de ces relations que l'on passe des formules (*a*) et (*c*) à celles (*b*) et (*d*).

Pour deux manivelles à double effet, montées à angle droit sur le même arbre, la formule (*d*) devient :

$$P = \frac{468n}{NV^2} K.$$

Pour les machines à vapeur à basse pression, Watt fait, dans les cas ordinaires de la pratique, K = 32 ; ce coefficient varie de 35 à 40 quand les machines commandent des filatures où l'on fabrique les *numéros* 40 à 60, et de 50 à 60 pour des filatures à *numéros* très fins. (Voir la *Troisième partie.*)

Le *numéro* d'un fil de coton est le nombre d'écheveaux de 1000 mètres pesant ensemble un demi-kilogramme. Ainsi le demi-kilogramme du numéro 50 contient 50 écheveaux.

K atteint parfois la valeur 25 pour des machines ou des usines qui n'ont pas besoin d'une grande régularité de mouvement, comme des scieries, des moulins à blé, des pompes, etc., et il atteint même 20 pour des marteaux de forge (119).

L'examen des formules précédentes fait voir que le poids du volant est d'autant plus petit que la vitesse de la jante est plus grande. L'expérience prouve que cette vitesse peut atteindre 25 à 30 mètres par seconde, mais qu'il est dangereux de dépasser cette limite.

Le rayon du volant est ordinairement égal à 5 ou 6 fois celui de la manivelle.

Application. En appliquant la formule (*d*) à une machine à basse pression, de la force de 40 chevaux, faisant marcher la filature de Logelbach, près Colmar, on trouve, pour le poids de la jante du volant, 9.320 kilog., au lieu de 9.450 kilog., comme l'avaient adopté les constructeurs Watt et Boulton.

Le diamètre moyen de la jante est de 6ᵐ,10, et le nombre de tours du volant, 19 par minute, ce qui donne une vitesse de 6ᵐ,06 par seconde. Les numéros des fils de coton varient de 40 à 60, ce qui a fait adopter 35 pour la valeur de K.

94. Volant pour une manivelle à simple effet et à contrepoids. Si, sur le prolongement d'une manivelle, au delà de son centre de rotation, on place un contrepoids, tel que le travail qu'il absorbera en s'élevant et restituera en descendant soit moitié de celui que produit la force motrice pour la 1/2 révolution pendant laquelle elle agit, cette manivelle agira comme une manivelle à double effet, et le poids du volant sera donné par la formule :

$$PV^2 + Qv^2 = \frac{4645n}{N} K.$$

P, V, n, N, K ont les mêmes significations qu'au numéro précédent ;
Q poids du contrepoids ;
v vitesse moyenne du centre de gravité du contrepoids.

Remarque. Les formules des nᵒˢ 93 et 94 s'appliquent encore au cas où le volant n'est pas placé sur l'arbre même de la manivelle, pourvu que N exprime toujours le nombre de tours de la manivelle par minute, tandis que V et v expriment la vitesse de la jante du volant et du contrepoids; mais, dans la pratique, il faut toujours placer le volant sur l'ar-

bre des organes qui rendent irrégulière la transmission ou l'absorption du travail moteur, et le plus près possible de ces organes.

95. Équilibre dynamique de l'excentrique. Dans une transmission de mouvement au moyen d'un excentrique, l'équilibre est périodique, et l'on doit avoir :

$$P \times 2\pi R = 4Fd + fF \times 2\pi r.$$

P puissance qui agit sur l'arbre de l'excentrique ;
R bras de levier de la puissance ;
F résistance appliquée à la bielle que met en mouvement l'excentrique ;
d distance du centre de rotation au centre de figure de l'excentrique, ou 1/2 espace parcouru par la résistance pour une demi-révolution de l'excentrique ;
f coefficient du frottement au pourtour de l'excentrique ;
r rayon de figure de l'excentrique ;
$P \times 2\pi R$ travail dépensé par la puissance pour une révolution de l'excentrique ;
$4Fd$ travail utile produit *id*
$fF \times 2\pi r$ travail absorbé par le frottement *id.*

L'excentrique présente les mêmes irrégularités de mouvement que la manivelle (88 à 91).

96. Équilibre dynamique du pilon (*Int.* 1714). En admettant que la puissance agisse verticalement sous le mentonnet pendant toute la course d'un pilon guidé par deux prisons, pour qu'il y ait équilibre dynamique, on doit avoir, pour chaque levée :

Fig. 13.

$$\mathcal{T}_m \quad \text{ou} \quad Ph = Qh \frac{d}{d - 2lf}. \qquad (a)$$

P force motrice agissant verticalement à l'extrémité du mentonnet;
h levée du pilon;
Ph travail moteur dépensé par levée du pilon;
Q poids du pilon et de sa tige;
Qh travail utile produit;
d distance d'axe en axe des deux prisons ou guides;
l longueur du mentonnet ou distance du point d'application de la puissance à l'axe de la tige;
i épaisseur de la tige dans le sens de l;
f coefficient de frottement de la tige sur ses guides.

La formule précédente fait voir que le travail utile Qh est d'autant plus petit, pour un même travail moteur Ph, que l est plus grand. Si l'on suppose $l = 0$, c'est-à-dire que la force P est appliquée à l'axe de la tige et agit suivant cet axe, on a :

$$Ph = Qh.$$

Ce qui montre que le travail utile serait alors égal au travail moteur. Cette condition ne peut être réalisée, puisqu'on ne peut supprimer les prisons ou guides.

Quand le pilon est soulevé par une came, comme cela a lieu ordinairement, le travail absorbé par le frottement de la came sous le mentonnet est analogue à celui absorbé par le frottement d'un pignon s'en-

grenant avec une crémaillère (84); seulement le pas a est remplacé par h. En tenant compte de ce frottement, et en supposant que son coefficient est le même que pour les prisons, la formule (a) devient :

$$\mathcal{T}_m = Qh \frac{d(2r + fh)}{2r(d - 2lf + f^2i)}.$$

n étant le nombre des coups de pilon donnés pendant une révolution de l'arbre à cames, et P la force motrice tangentielle qui agit à l'extrémité du rayon r, on doit avoir, pour l'équilibre dynamique,

$$n\mathcal{T}_m = 2\pi r P,$$

d'où
$$P = \frac{n\mathcal{T}_m}{2\pi r} = nQh \frac{d(2r + fh)}{4\pi r^2(d - 2lf + f^2n)}.$$

Les cames se font en développante de cercle (*Int.* 1237).

La durée totale d'un coup de pilon se compose du temps t que met la came à élever le pilon à la hauteur h, de celui $t' = \sqrt{\frac{2h}{g}}$ de la descente du pilon (19) et de 1/10 à 1/6 de $t + t'$ pour le temps employé par le pilon à agir sur la matière, qui peut être plus ou moins compressible.

97. Choc des corps solides. Quand deux corps solides, en vertu de vitesses acquises sous l'influence de causes quelconques, tendent à occuper au même instant une même partie de l'espace, dès qu'ils arrivent à être ce qu'on appelle en contact, il se produit des actions mutuelles répulsives qui atteignent un degré suffisant d'intensité pour modifier en grandeur ou en direction, ou à la fois en grandeur et en direction, les vitesses primitives des deux corps, de manière que ceux-ci ne viennent pas occuper la même portion de l'espace au même instant, et par là, satisfont à la loi générale de l'*impénétrabilité de la matière* (*Int.* 1534 et suivants).

Lorsque deux corps se rapprochent ainsi de manière à donner naissance à ces actions mutuelles par leurs changements plus ou moins sensibles de forme, on dit qu'il y a *choc* ou *collision* entre les deux corps.

Le choc de deux corps n'influe en rien sur le mouvement du centre de gravité du système, mouvement qui ne dépend en intensité et en direction que des forces extérieures (*Int.* 1636).

98. Vitesse du centre de gravité de l'ensemble de deux corps solides après leur choc (*Int.* 1671).

Supposons le cas le plus simple, celui où les centres de gravité des deux corps se meuvent suivant une même droite par rapport à laquelle les deux corps sont symétriques. C'est à ce cas qu'on ramène les applications pratiques sur le choc.

Le centre de gravité de l'ensemble se mouvra sur la droite suivie par les deux corps, comme si le choc n'avait pas lieu; de plus, il est évident que la vitesse de chacun des corps en particulier ne changera pas

de direction, mais bien d'intensité, et même l'une pourra changer de signe.

Soient m et m' les masses des deux corps, v et v' leurs vitesses respectives avant le choc, et u la vitesse du centre de gravité.

Dès que le choc commence, les actions mutuelles égales agissent en sens contraire sur chacun des deux mobiles et produisent des changements de forme et des vibrations qui dépendent de la nature et de la forme des corps.

Si la vitesse relative des deux corps l'un par rapport à l'autre est faible, et que les corps aient une certaine consistance, on peut admettre que le changement de forme pendant le choc s'étend à peu de distance du point de contact et que les vibrations des molécules sont très faibles ; d'où il résulte que le mouvement de toutes les molécules de chacun des corps peut être considéré comme n'étant qu'un simple mouvement de translation, qui est le même pour toutes les molécules.

En se plaçant dans cette hypothèse, V étant la vitesse commune à tous les points et au centre de gravité du solide de masse m à un instant quelconque du choc, et V' celle de tous les points et du centre de gravité du solide de masse m' au même instant, on a, en négligeant pendant le choc les impulsions des forces extérieures, s'il y en a, ce que l'on peut faire, puisque la durée du choc est très petite (*Int.* 1635) :

$$mV + m'V' + mv + m'v'.$$

Il y a toujours, pendant le choc, un instant où les centres de gravité des deux corps ont la même vitesse, qui est aussi la vitesse u du centre de gravité du système ; à cet instant, l'équation précédente devient :

$$(m + m')u = mv + m'v', \qquad \text{d'où} \qquad u = \frac{mv + m'v'}{m + m'}.$$

u est la vitesse du centre de gravité, et sensiblement aussi celle de tous les points du système à l'instant considéré, dans le cas de très faibles vibrations.

Lorsque les deux corps ne sont pas élastiques, c'est-à-dire quand ils conservent les formes que des forces extérieures peuvent leur donner, les actions mutuelles cessent leur effet dès que la vitesse u est devenue commune aux deux corps ; alors les deux corps se meuvent en restant en contact, tant que des forces extérieures ne viennent pas modifier leur vitesse commune u.

Les formules précédentes s'appliquent au cas où les corps marchent en sens contraires, comme à celui où ils vont dans le même sens ; seulement il faut avoir égard aux signes qu'il convient de donner aux valeurs de v et v', et par suite à celles de mv et $m'v'$. Le signe de u est toujours celui de la plus grande quantité de mouvement.

Si les deux quantités de mouvement sont égales et de signes contraires, la formule précédente donne $u = 0$; ce qui montre que les corps arrivent au repos, et y restent s'ils sont dénués d'élasticité.

Dans le cas où l'un des corps est au repos, c'est-à-dire où l'on a $v' = 0$, l'équation précédente devient :

$$(m + m')u = mv, \quad \text{d'où} \quad u = \frac{mv}{m + m'}. \qquad (a)$$

99. Perte de puissance vive due au choc de deux corps non élastiques. Si les corps restent unis après s'être comprimés, et qu'on néglige les vibrations auxquelles peuvent être soumises les molécules des deux corps, il y a perte de puissance vive dans le système, puisque, pendant la compression des deux corps, et jusqu'au moment où une même vitesse est devenue commune aux deux corps, les molécules voisines du contact se sont rapprochées, et par suite les actions mutuelles répulsives de ces molécules ont produit un travail négatif, d'où il est résulté une perte de puissance vive (*Int.* 1637).

Le travail dû aux forces moléculaires, et par suite la perte de puissance vive du système, ne dépendant que du mouvement relatif des deux corps, il en résulte que, pour calculer cette perte, on peut supposer que l'un des corps est en repos et que l'autre vient le choquer avec une vitesse absolue égale à la vitesse relative du système.

Soient donc v la vitesse de la masse choquante m, et $v' = 0$ la vitesse de la masse choquée m'.

La puissance vive du système avant le choc est $\frac{1}{2}mv^2$. Après le choc, les molécules des deux corps ayant la même vitesse u, à cet instant la puissance vive du système est (29) :

$$\frac{1}{2}(m + m')u^2.$$

La perte de puissance vive due au choc est alors:

$$\varphi = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}(m + m')u^2.$$

Remplaçant dans cette expression u par sa valeur (a) (98), on obtient :

$$\varphi = \frac{1}{2}\frac{mm'v^2}{m + m'}.$$

Dans le calcul des machines, la perte de puissance vive due à un choc se calcule en général à l'aide de cette formule (*Int.* 1675).

Établissant un certain rapport entre m et m', c'est-à-dire faisant $m' = Nm$, on conclut :

$$\varphi = \frac{1}{2}mv^2\frac{1}{1 + \frac{1}{N}},$$

formule qui fait voir que la perte de puissance vive est d'autant plus

petite que la valeur de N est plus petite, c'est-à-dire que la masse choquante m est plus grande par rapport à la masse choquée m'.

Voir *Int.* n° 1673 pour *la durée du choc et l'intensité des forces ou actions mutuelles,* et n° 1674 pour *le choc des corps d'une élasticité parfaite.*

100. Corps tournant autour d'un axe fixe. On appelle *vitesse angulaire* d'un corps tournant autour d'un axe, la longueur de l'arc décrit, ou qui serait décrit si le mouvement en restant uniforme était suffisamment prolongé, pendant l'unité de temps, par un point situé à l'unité de distance de l'axe et lié invariablement au corps.

ω étant la vitesse angulaire d'un corps, et v la vitesse de l'un quelconque de ses points situé à une distance r de l'axe, on a, en remarquant que les vitesses des divers points sont proportionnelles à leurs distances à l'axe :

$$v : \omega = r : 1, \quad \text{d'où} \quad v = \omega r, \quad \text{et} \quad \omega = \frac{v}{r}.$$

101. Puissance vive d'un corps tournant autour d'un axe fixe. Lorsqu'un élément matériel m tourne autour d'un axe, sa vitesse étant ωr, sa puissance vive est (29) :

$$\frac{1}{2} m \omega^2 r^2.$$

Lorsqu'un corps solide tourne, chacun de ses points matériels possède une puissance vive d'une expression analogue à la précédente, et en faisant la somme de toutes ces puissances vives élémentaires, on a la puissance vive du corps, qui peut alors être représentée par :

$$P = \sum \frac{1}{2} m \omega^2 r^2,$$

$\sum$ signifiant somme.

Comme $\frac{1}{2}\omega^2$ est commun à toutes les parties de cette somme, on peut le mettre en facteur commun, et poser :

$$P = \frac{1}{2}\omega^2 \sum mr^2.$$

mr^2, produit d'un élément matériel par le carré de sa distance à l'axe de rotation, est ce qu'on appelle *le moment d'inertie de l'élément* m *par rapport à cet axe.*

$\sum mr^2$, somme des moments d'inertie de tous les éléments matériels d'un corps par rapport à un axe, est *le moment d'inertie du corps par rapport à cet axe.*

La formule précédente fait voir que *la puissance vive d'un solide tournant autour d'un axe fixe est, à un instant quelconque, égale à la moitié du produit du carré de la vitesse angulaire du corps à cet instant par le moment d'inertie du corps par rapport à l'axe de rotation.*

102. Rayon de gyration (*Int.* 1614). Il existe une valeur R de r telle, que si toute la masse du corps se trouvait à la distance R de l'axe, la puissance vive et par suite le moment d'inertie, pour une même vitesse angulaire par rapport au même axe, n'auraient pas changé. Cette distance R est le rayon de gyration du corps.

Appelant R le rayon de gyration, M la masse et $P = Mg$ le poids du corps, le moment d'inertie est alors (101) :

$$\sum mr^2 = MR^2 = \frac{P}{g} R^2,$$

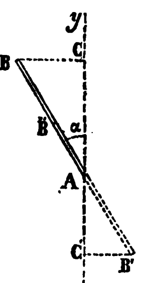
et la puissance vive :

$$\mathcal{P} = \frac{1}{2} \omega^2 MR^2 = \frac{1}{2} \omega^2 \frac{P}{g} R^2.$$

Nous allons donner les valeurs du rayon de gyration des corps homogènes de formes géométriques employées dans la pratique. (Voir *Int.* 1826 pour la détermination du rayon de gyration d'un corps de forme quelconque.)

103. Rayon de gyration d'une tige homogène AB d'une très petite section tournant autour de l'axe Ay passant par son extrémité. On a (*Int.* 1615, 1825) :

Fig. 14.



$$R^2 = \frac{1}{3} \overline{BC}^2.$$

Le moment d'inertie est alors (102) :

$$\frac{P}{g} R^2 = \frac{1}{3} \frac{P}{g} \overline{BC}^2,$$

et la puissance vive:

$$\mathcal{P} = \frac{1}{6} \frac{P}{g} \omega^2 \overline{BC}^2.$$

Pour la tige BB' *qui est rencontrée par l'axe en un point quelconque de sa longueur,* r étant le rayon de gyration de la partie AB, et r' celui de la partie AB, on a:

$$r^2 = \frac{1}{3} \overline{BC}^2 \quad \text{et} \quad r'^2 = \frac{1}{3} \overline{B'C'}^2.$$

P et P' étant les poids dee parties AB et AB' de la tige, les moments d'inertie de ces parties sont respectivement :

$$\frac{P}{g} r^2 = \frac{1}{3} \frac{P}{g} \overline{BC}^2 \quad \text{et} \quad \frac{P'}{g} r'^2 = \frac{1}{3} \frac{P'}{g} \overline{B'C'}^2.$$

Le moment d'inertie de la tige totale étant égal à la somme des moments d'inertie des deux parties, on a donc, R étant le rayon de gyration

de la tige totale :

$$\frac{P+P'}{g}R^2=\frac{1}{3}\frac{P}{g}\overline{BC}^2+\frac{1}{3}\frac{P'}{g}\overline{B'C'}^2,\ \text{d'où}\ R^2=\frac{P\times\overline{BC}^2+P'\times\overline{B'C'}^2}{3(P+P')}.$$

Dans le cas où le point A est le milieu, c'est-à-dire le centre de gravité de la tige, on a $B'C'=BC$, $P'=P$ ou $P+P'=2P$, et la formule précédente donne :

$$R^2=\frac{1}{3}\overline{BC}^2.$$

Ce qui fait voir que le rayon de gyration de la tige totale est le même que celui de chacune de ses parties considérées séparément.

Si l'axe rencontrait le prolongement de la tige BB″ en A, on remarquerait que le moment d'inertie de BB″ est la différence des moments d'inertie des tiges BA et B″A, et on l'obtiendrait en suivant la même marche que pour déterminer le moment d'inertie de BB′. Du reste, nous verrons (115) comment, étant connu le moment d'inertie d'un corps par rapport à un axe passant par son centre de gravité, on peut déterminer son moment d'inertie par rapport à un axe parallèle au premier.

104. Rayon de gyration d'un arc de cercle AB, d'une très petite section, tournant autour de son rayon OA passant par l'une de ses extrémités. On a :

Fig. 15.

$$R^2=\frac{1}{2}\rho^2\left(1-\frac{1}{2}\frac{\rho}{l}\sin 2\alpha\right). \qquad (a)$$

$\rho=OA$ rayon de courbure de la tige ;
$l=$ longueur de l'arc AB ;
α angle au centre correspondant à l'arc AB.

Pour un quart de cercle ou un demi-cercle, ou trois quarts de cercle..., c'est-à-dire pour $\alpha=90°$, $\alpha=180°$, $\alpha=270°$..., on a $\sin 2\alpha=0$, et, par suite,

$$R^2=\frac{1}{2}\rho^2.$$

Ayant R^2, on aura le moment d'inertie en multipliant R^2 par la masse $\frac{P}{g}$ de la tige, et ce moment d'inertie multiplié par $\frac{1}{2}\omega^2$, moitié du carré de la vitesse angulaire à un certain instant, donnera la puissance vive à cet instant.

A l'aide de la formule (*a*), et en suivant la même marche qu'au numéro précédent, on déterminerait le rayon de gyration, le moment d'inertie et la puissance vive, soit que l'axe OA rencontre l'arc AB en un point quelconque compris entre A et B, soit qu'il rencontre le prolongement de cet arc.

On verrait encore que quand l'axe rencontre l'arc au milieu, c'est-à-dire quand il passe par son centre de gravité, le rayon de gyration de l'arc entier est le même que pour chacune des deux moitiés prises séparément.

105. *Pour un disque en quart de cercle d'une très faible et uniforme épaisseur* tournant autour d'un des rayons qui le limitent, ou pour un demi-cercle qui tourne autour du diamètre qui le limite, ou encore pour trois quarts de cercle et pour un cercle entier, on a :

$$R^2 = \frac{1}{4}\rho^2,$$

ρ étant le rayon du disque.

Ayant R^2, on obtiendra facilement le moment d'inertie, puisque, connaissant les dimensions du disque, on peut calculer son volume, lequel, multiplié par la densité de la matière, donne le poids du disque. Ayant le moment d'inertie, on obtient la puissance vive en la multipliant par la moitié du carré de la vitesse angulaire (102).

106. *Un cylindre droit à base circulaire tournant autour de son axe, ou un secteur quelconque de ce cylindre tournant autour de cet axe*, donne, R étant le rayon de gyration et ρ le rayon du cylindre :

$$R^2 = \frac{1}{2}\rho^2.$$

Ayant R^2, on détermine le moment d'inertie, puis la puissance vive, comme au numéro précédent (*Int.* 2°, 1825).

107. *Pour une jante à section rectangulaire, ou pour une portion de cette jante tournant autour de l'axe*, on a (*Int.* 3°, 1825) :

$$R^2 = \frac{1}{2}(\rho^2 + \rho'^2),$$

ou en remplaçant les rayons extérieur et intérieur ρ et ρ' de la jante en fonction du rayon moyen $\rho_1 = \frac{\rho + \rho'}{2}$ et de la dimension $b = \rho - \rho'$ de la jante mesurée suivant le rayon :

$$R^2 = \rho_1^2 + \frac{b^2}{4}.$$

108. *Un cône droit à base circulaire tournant autour de son axe* donne, ρ étant le rayon de cette base (*Int.* 4°, 1825) :

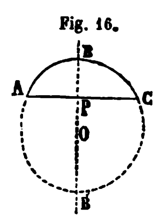
$$R^2 = \frac{3}{10}\rho^2.$$

109. *Pour un tronc de cône tournant autour de son axe*, on remarquerait que le moment d'inertie du tronc est égal au moment d'inertie du cône total, moins le moment d'inertie du cône retranché pour obtenir le tronc. Ayant le moment d'inertie du tronc, en le divisant par la masse $\frac{P}{g}$ on aurait R^2.

110. *Un segment sphérique* ABC, *à une base, tournant autour du diamètre* BB' *perpendiculaire au plan de sa base, c'est-à-dire passant par*

son centre de gravité, donne :

Fig. 16.



$$R^2 = \frac{h}{10} \times \frac{20\rho^2 - 15\rho h + 3h^2}{3\rho - h}.$$

ρ rayon de la sphère;
$h =$ BP hauteur du segment.

Pour une demi-sphère, $h = \rho$, et la formule précédente devient:

$$R^2 = \frac{2}{5}\rho^2.$$

Pour la sphère entière, R^2 a aussi cette dernière valeur.

111. *Pour une zone sphérique* ABC *à une base* (fig. 16), *tournant autour du diamètre* BB' *perpendiculaire à sa base, l'épaisseur de la calotte étant très mince*, on a, ρ et h ayant les mêmes significations qu'au numéro précédent :

$$R^2 = h\left(\rho - \frac{h}{3}\right).$$

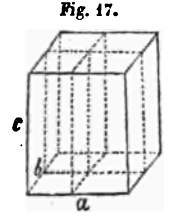
Si la calotte était une demi-sphère, on aurait $h = \rho$, et, par suite :

$$R^2 = \frac{2}{3}\rho^2.$$

Pour une sphère creuse entière et très mince, on aurait aussi cette dernière valeur pour R^2.

112. *Un parallélipipède rectangle ayant* a, b, c *pour arêtes, et tournant autour de l'arête* c, donne (*Int.* 1826) :

Fig. 17.



$$R^2 = \frac{1}{3}(a^2 + b^2). \qquad (a)$$

Si le parallélipipède, au lieu de tourner autour de c, *tournait autour d'un axe mené par le milieu de* b *parallèlement à* c, on aurait :

$$R^2 = \frac{1}{3}\left(a^2 + \frac{1}{4}b^2\right);$$

ce qui revient à remplacer b par $\frac{1}{2}b$ dans la formule (a).

Si l'axe était mené parallèlement à c *par le centre de figure, qui est aussi le centre de gravité*, il faudrait, dans la formule (a), remplacer b par $\frac{1}{2}b$ et a par $\frac{1}{2}a$; ce qui donnerait :

$$R^2 = \frac{1}{12}(a^2 + b^2).$$

113. *Pour un ellipsoïde quelconque* (*Int.* 1625), c'est-à-dire pour un ellipsoïde dont le plan perpendiculaire au grand axe $2a$ détermine, non pas un cercle de diamètre $2b$ comme pour l'ellipsoïde de révolution,

mais une ellipse ayant $2b$ et $2c$ pour axes, on a respectivement, suivant que l'ellipsoïde tourne autour de l'axe $2c$, ou $2b$, ou $2a$:

$$R^2 = \frac{1}{5}(a^2+b^2), \quad R^2 = \frac{1}{5}(a^2+c^2), \quad R^2 = \frac{1}{5}(b^2+c^2).$$

Lorsque l'ellipsoïde est de révolution, on a $c = b$, et les trois formules précédentes se réduisent aux deux suivantes :

$$R^2 = \frac{1}{5}(a^2+b^2), \quad R^2 = \frac{1}{5}(b^2+b^2) = \frac{2}{5}b^2,$$

applicables respectivement au cas où l'ellipsoïde tourne autour de son petit ou de son grand axe.

Le volume de l'ellipsoïde quelconque étant $\frac{4}{3}\pi abc$, et celui de l'ellipsoïde de révolution, $\frac{4}{3}\pi a^2 b$ ou $\frac{4}{3}\pi b^2 a$ suivant que l'ellipse génératrice tourne autour du petit ou du grand axe (*Int.* 1166), multipliant ce volume par la densité de la matière, on aura le poids P ; on en conclura ensuite la masse $\frac{P}{g}$, puis le moment d'inertie $\frac{P}{g}R^2$.

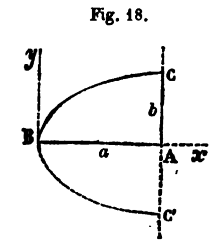
Faisant $a = b = \rho$, les formules relatives à l'ellipsoïde de révolution donnent :

$$R^2 = \frac{2}{5}\rho^2.$$

Ce qui devait être, puisqu'alors l'ellipsoïde est une sphère (110).

114. *Pour un cylindre droit à base demi-parabolique* ABC *tournant autour de l'arête qui se projette en* A, on a, en faisant $AB = a$ et $AC = b$, (*Int.* 1826) :

Fig. 18.



$$R^2 = \frac{1}{5}\left(\frac{8}{7}(a^2+b^2)\right).$$

Pour un cylindre droit à base parabolique CBC', on a la même valeur pour R^2.

On a (*Int.* 1221, 1800) surface $ABC = \frac{2}{3}ab$; connaissant la hauteur du cylindre, on déterminera son volume, puis son poids, et ensuite son moment d'inertie.

115. Moments d'inertie d'un corps par rapport à deux axes parallèles. R étant le rayon de gyration d'un corps par rapport à un axe quelconque, et R' celui par rapport à l'axe passant par le centre de gravité du corps et parallèle au premier, on a, en appelant k la distance des deux axes parallèles :

$$MR^2 = MR'^2 + Mk^2, \quad \text{d'où} \quad R^2 = R'^2 + k^2, \qquad (Int.\ 1627)$$

c'est-à-dire que *le carré du rayon de gyration d'un système solide par rapport à un axe quelconque est égal au carré du rayon de gyration du*

même système par rapport à l'axe mené parallèlement au premier par le centre de gravité, plus le carré de la distance des deux axes. R est l'hypoténuse d'un triangle rectangle qui a R′ et k pour côtés de l'angle droit.

Cette formule est employée dans la pratique, où il arrive souvent que l'on est conduit à déterminer le rayon de gyration par rapport à un axe, d'un corps dont on connaît le rayon de gyration par rapport à un axe parallèle passant par le centre de gravité.

116. Marteaux. Perte de puissance vive due au choc des cames. Considérant une bague à cames comme étant un cylindre plein, le carré de son rayon de gyration est (102 à 106) :

$$\frac{1}{2}\rho^2,$$

et son moment d'inertie, en appelant M la masse de la bague :

$$\frac{1}{2}M\rho^2.$$

Appelant M′ la masse du corps qui a, en le supposant concentré au point d'impact, c'est-à-dire au point de la came qui frappe le marteau, le même moment d'inertie que la bague tournant autour de son axe, et R la distance de ce point d'impact à l'axe de rotation, on a :

$$M'R^2 = \frac{1}{2}M\rho^2, \quad \text{d'où} \quad M' = \frac{1}{2}M\frac{\rho^2}{R^2}.$$

Il faut calculer de même la masse M″ du corps, lequel, étant appliqué au point d'impact, a le même moment d'inertie que l'arbre de la bague, et posant $m = M' + M''$, m représente la masse choquante à faire intervenir dans la formule du n° 99.

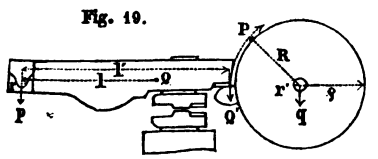
En opérant d'une manière analogue, et en ayant égard à la forme et à la nature des différentes parties du marteau et de son manche, on détermine la masse choquée m', laquelle étant appliquée au point d'impact, a, par rapport à l'axe de la *hurasse*, le même moment d'inertie que le marteau avec son manche.

Ayant m et m', la formule du n° 99 donne la perte de puissance vive pour chaque soulèvement du marteau, en remarquant que la vitesse du corps choqué est nulle, et que la vitesse moyenne du corps choquant est, n étant le nombre de tours de la bague par minute :

$$v = \frac{2\pi Rn}{60}.$$

117. Équilibre dynamique des marteaux. Soit un *marteau frontal* (*fig.* 19). On remplace le poids du marteau et de son manche par un poids, tel qu'étant appliqué au point d'impact, il ait, par rapport à l'axe de la hurasse, le même moment que le poids du marteau et de son manche; on en fait autant pour le frot-

Fig. 19.



tement des tourillons de la hurasse, pour celui des tourillons de l'arbre à cames et pour celui qui s'exerce entre les cames et le marteau; et le travail absorbé pour élever tous ces poids fictifs, augmenté de la perte de puissance vive due au choc, étant égal au travail que doit produire la puissance, l'équilibre dynamique donne, pour une minute:

$$n \times 2\pi RP = nn'h\left(\frac{Ql}{l'} + \frac{f'pr}{l'} + \frac{f'qr'}{R} + Q'\frac{fh}{2} \times \frac{R+l'}{Rl'}\right) + \frac{nn'}{2} \times \frac{m'v^2}{m+m'}.$$

n nombre de tours de la bague en une minute ;
n' nombre des cames montées sur la bague ;
P puissance agissant sur l'arbre à cames à l'extrémité d'un bras de levier égal à la distance du point d'impact à l'axe de l'arbre à cames ;
R bras de levier de la puissance P ;
h levée du marteau au point d'impact ;
Q poids du marteau et de son manche ;
l distance du centre de gravité du marteau et de son manche à l'axe de rotation de la hurasse ;
l' distance du point d'impact à l'axe de rotation de la hurasse ;
$f' = 0{,}15$ coefficient de frottement des tourillons de la hurasse, et de ceux de l'arbre à cames ;
$p = Q\,\frac{l'-l}{l'}$ poids reposant sur les tourillons de la hurasse ; c'est la partie du poids du marteau et de son manche supportée par ces tourillons (*Int.* 1544) ;
r rayon des tourillons de la hurasse ;
q pression des tourillons de l'arbre à cames sur leurs coussinets ;
r' rayon des tourillons de l'arbre à cames ;
$f = 0{,}25$ coefficient de frottement des cames sous la tête du marteau ;
$Q' = \frac{Ql}{l'}$ pression qui s'exerce entre les cames et la tête du marteau, en ne tenant compte que de la pression due au poids du marteau et en négligeant celle qui provient du frottement des tourillons de la hurasse ;
m masse choquée transportée au point d'impact, calculée comme il est indiqué n° 116.
m' masse choquée transportée au point d'impact, calculée comme la masse choquante ;
$v = \frac{2\pi Rn}{60}$ vitesse moyenne des cames au point d'impact (116) ;
$n \times 2\pi RP$ travail moteur dépensé par minute ;
$Q'\,\frac{l'}{l}$ poids du marteau et de son manche, transporté au point d'impact ;
$f'p\,\frac{r}{l'}$ poids qui, étant appliqué au point d'impact, produit le même effet que le frottement des tourillons de la hurasse ;
$Q'\,\frac{fh}{2} \times \frac{R+l'}{Rl'}$ frottement des cames sous la tête du marteau; il est analogue à celui des engrenages (82) ;
$\frac{nn'}{2} \times \frac{mm'v^2}{m+m'}$, perte de puissance vive due aux chocs des cames sous le marteau (116).

De la formule précédente on tire :

$$P = \frac{n'h}{2\pi R}\left(\frac{Ql}{l'} + \frac{f'pr}{l'} + \frac{f'qr'}{P} + fQ'\,\frac{h}{2} \times \frac{R+l'}{Rl'}\right) + \frac{n'}{4\pi R} \times \frac{mm'v^2}{m+m'}.$$

Pour un autre genre quelconque de marteau, on déterminerait la valeur de P en opérant d'une manière analogue.

Les marteaux à bascule, dits martinets, employés à l'étirage et au platinage des petits fers, au raffinage des aciers et à la fabrication de divers outils, frappent de 200 à 400 coups par minute, et leur poids, qui diminue à mesure que le nombre de coups frappés augmente, varie, non compris le poids du manche, qui est en bois, de 80 à 40 kilog. La longueur totale du manche, comptée depuis l'axe de la tête du marteau, varie de $2^m,50$ à 3 mètres. Le point de rotation est ordinairement aux 2/3 de cette longueur à partir de l'axe de la tête du marteau; cependant, il est aux 3/4 et quelquefois plus éloigné quand le marteau doit frapper un grand nombre de coups. Le nombre des cames montées sur la bague varie ordinairement de 14 à 16. Pour une grande vitesse, la levée du marteau varie de $0^m,25$ à $0^m,27$; pour une petite vitesse, elle varie de $0^m,50$ à $0^m,55$, et pour une vitesse moyenne, elle est comprise entre $0^m,30$ et $0^m,40$.

Les marteaux à soulèvement, employés particulièrement à l'affinage du fer par la méthode allemande, frappent de 70 à 200 coups à la minute, et leur poids, non compris le manche, qui est en bois, varie de 300 à 400 kilog. La longueur du manche, comptée depuis l'axe de la tête du marteau jusqu'au point de rotation de la *bogue*, varie de $2^m,10$ à $2^m,60$, et la distance de cet axe au point frappé par les cames, de $0^m,40$ à $0^m,55$. Il y a ordinairement cinq cames montées sur la bague. La levée du marteau est de $0^m,55$ environ.

Enfin, *les marteaux frontaux*, mis en usage dans les forges où l'on fabrique le fer par la méthode anglaise, frappent de 60 à 100 coups par minute, et pèsent, y compris le manche, qui est tout en fonte, de 2.500 à 4.000 kilog., et même quelquefois plus. La longueur du manche, depuis le point d'impact jusqu'à l'axe de rotation, varie de $2^m,30$ à $2^m,80$. Le nombre des cames est ordinairement égal à 5. La levée du marteau varie de $0^m,35$ à $0^m,40$.

Dans la pratique, d'après Poncelet, le rapport de la masse fictive choquante m à la masse fictive choquée m' est rarement inférieur à 10 (116). Pour les martinets et marteaux à soulèvement, employés à la fabrication du fer, ce rapport n'est pas inférieur à 12, et pour les marteaux frontaux, il est au moins 30.

Le rapport de l'effet utile à l'effet dépensé qui paraît le plus généralement admis par les praticiens est :

Pour les martinets.	0,18 à 0,25
Pour les marteaux allemands.	0,35
Pour les marteaux frontaux.	0,40
Pour les marteaux-pilons à vapeur	0,40

Des expériences faites par M. Clarinval, capitaine d'artillerie, professeur de mécanique appliquée à l'ancienne école de Metz, ont donné au minimum 0,51 pour le marteau-pilon, système de M. Schmerber. Ce marteau était mû par une came agissant suivant son axe et monté sur

un arbre qui recevait son mouvement d'une machine à vapeur à l'aide d'une courroie.

M. Schmerber a établi des marteaux dans lesquels la came, au lieu d'être en développante de cercle, affecte la forme d'une spirale; elle n'élève plus alors le marteau qu'à une très faible hauteur, et elle permet de supprimer une série de rondelles en caoutchouc destinée uniquement à diminuer le choc de la came.

Dans tous les systèmes, on peut faire varier le nombre de coups, sans agir sur le moteur, en donnant à la courroie plus ou moins de prise sur la poulie de transmission.

Le tableau suivant, publié en 1859 par M. Armengaud dans le *Génie industriel*, donne la force approximative qu'exigent les différents systèmes de marteaux Schmerber.

SYSTÈME	POIDS des pilons.	FORCE approximative en chevaux.	NOMBRE de coups par minute.
	kilogr.		
Came en développante de cercle. . .	45 à 50	0,75	180
	85 à 95	1,50	160
	160 à 180	2,50	130
	240 à 260	3,50	115
	350 à 380	6,00	»
	550 à 650	8,00	»
Came en spirale sans boîte à rondelles inférieures.	120 à 130	6 à 8	280 à 300
	70 à 90	3 à 5	300 à 350
	40 à 50	2 à 3,5	300 à 500
Rabat à vapeur.	120 à 130	6 à 8	280 à 300
	70 à 90	3 à 5	300 à 400

118. **Marteau-pilon.** Actuellement, dans les usines à fer, et aussi dans les grands ateliers de construction, on fait usage du *marteau-pilon* mû directement par la vapeur. Ces marteaux ont été établis dans des proportions très diverses : ainsi, il y en a qui pèsent 100 kilogr. seulement, et d'autres 4000 kilogr. et même beaucoup plus; ceux de 100 à 1000 kilogr. donnent de 80 à 100 coups par minute, et ceux de 2000 à 4000 kilogr. en donnent de 60 à 70.

Pour des marteaux-pilons du poids de 3500 à 4000 kilogr., les chutes atteignent 2 mètres à $2^{m},50$.

Un avantage capital de ces marteaux, c'est qu'on peut faire varier leur chute et leur vitesse avec la plus grande facilité, selon les dimensions et l'état de dureté de la pièce que l'on forge.

Dimensions d'un marteau-pilon établi par M. Nillus, du Havre, d'après le système Nasmyth, pour les ateliers de la marine à Brest :

Poids total des deux bâtis.	14000 kil.
id. de la plaque de fondation.	8000
id. du cylindre.	3500
id. du marteau.	3500
id. des accessoires en fer.	1200
id. *id.* en fonte de cuivre.	400
Total.	30600

L'enclume ayant été fabriquée à Brest, son poids n'est pas compris dans ce total.

Pression de la vapeur.	5 atmosphères.
Diamètre du cylindre.	$0^m,60$
Course du piston ou levée du marteau.	$2^m,00$
Diamètre de la tige.	$0^m,10$

A l'usine de Kirkstail, à Leeds (Angleterre), on a établi pour la compagnie australienne du chemin de fer Victoria, un marteau dont l'effet est équivalent à celui que produirait un poids de 16 tonnes frappant 40 coups par minute. Ce marteau est à double effet, suivant le principe de Taylor; la vapeur agit dans un sens pour soulever le marteau, et dans l'autre sens pour précipiter sa chute et augmenter l'action de la pesanteur. La vapeur est obtenue avec la chaleur perdue du foyer où l'on chauffe le fer à marteler.

Le poids de tout l'appareil (marteau, enclume, chabotte, cylindre à vapeur, etc.) est de 100 tonnes environ.

Les marteaux-pilons sont à simple effet ou à double effet. Dans les marteaux à simple effet, la vapeur élève le marteau; mais, pendant la descente du piston, la vapeur n'agit pas et le marteau descend par son propre poids. La vapeur est admise à pleine pression et, pour limiter la hauteur de course du marteau, on intercepte l'admission de la vapeur. Dans les marteaux à double effet, pendant la descente du marteau, la vapeur agit pour augmenter l'énergie du choc.

La fabrication des canons en acier, remplaçant les canons coulés en bronze, a développé l'application des marteaux-pilons. Dans les aciéries Krupp, à l'usine d'Essen, en Prusse, ont été installés des marteaux-pilons de 50 tonnes. Le marteau-pilon de l'aciérie d'Aboukoff a coûté plus de deux millions de francs. Les fondations de la chabotte s'étendent à 18 mètres de profondeur. Cette chabotte pèse 504 tonnes. Le marteau pèse 44 tonnes.

En 1878, il y avait, à l'Exposition universelle, le modèle d'un marteau-pilon du Creusot qui fonctionnait dans cette usine et dont le marteau pesait 80 tonnes. Depuis, ce poids a été porté à 100 tonnes et la chute du marteau a été portée à 5 mètres. Chaque coup de marteau produit donc un travail de 500000 kilogrammètres. La chabotte ou la partie recevant le coup de marteau a $5^m,60$ de hauteur. Elle est formée de cinq assises horizontales pesant chacune 120 tonnes et composée de deux morceaux assemblés, l'assise supérieure exceptée, qui est une masse pesant 120 tonnes; soit pour un ensemble de 720 tonnes porté sur un massif de maçonnerie de 600 mètres cubes, reposant sur le rocher situé à 11 mètres au-dessous du sol.

La chabotte est un tronc de pyramide de $5^m,60$ de hauteur dont la base inférieure a 32 mètres carrés et la base supérieure, formant le sommet, a 7 mètres carrés.

Cette chabotte en fonte est séparée de la fondation en maçonnerie par un lit de madriers de chêne, placés horizontalement, et formant une épaisseur d'un mètre.

La Société des Hauts Fourneaux, forges et aciéries de la marine et

des chemins de fer a construit dans ses usines de Saint-Chamond (Loire) un marteau-pilon de 80 tonnes. Au moyen de ces gros marteaux, on peut marteler des pièces de forge pesant 100 et même 120 tonnes.

119. Volants pour marteaux. Le travail produit par la force P (117), pendant la durée totale d'un coup de marteau, étant absorbé pendant l'instant que met la came à soulever le marteau, il faut que le volant, ou l'attirail (roue et arbre à cames) qui le remplace le plus souvent, accumule, depuis l'instant où une came quitte le marteau, jusqu'à l'instant où la came suivante le reprend, une quantité de puissance vive égale à l'excès du travail $\mathcal{T}$ produit par la force P pendant la durée totale d'un coup, sur le travail $\mathcal{T}'$ que produit cette force pendant le temps d'action de la came.

Le travail produit par P étant régulier, on aura $\mathcal{T}$ et $\mathcal{T}'$ quand on connaîtra les temps pendant lesquels ces quantités de travail sont produites. On connaît $\mathcal{T}$, puisqu'on a le nombre des coups de marteau frappés dans un temps donné, et par suite la durée d'un coup. Comme la vitesse de rotation de la bague est à peu près régulière, à l'aide d'une épure représentant la position des cames sous le manche du marteau, on aura l'arc décrit par la bague pendant l'action de la came, et, par suite, la durée de cette action, ce qui permettra de déterminer $\mathcal{T}'$. Cette épure servira aussi à trouver l'écartement à donner aux cames, écartement qui doit être tel que, pendant l'instant d'inaction de deux cames successives, le marteau ait le temps de réagir sous le rabat et de redescendre sur l'enclume; sans quoi le marteau *camerait*, c'est-à-dire retomberait sur la came qui arrive pour le soulever, avant d'avoir produit son effet sur le fer. D'après Faure, il résulterait de quelques observations faites par Walter de Saint-Ange sur des marteaux et martinets établis, que, pour les marteaux à soulèvement, le temps nécessaire à la réaction sous le rabat et à la descente varie de $1,04t$ à $1,15t$, et que, pour les martinets, il varie de $0,45t$ à $0,88t$, suivant que le nombre de coups frappés est respectivement plus grand ou plus petit.

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}}. \qquad (19)$$

t durée de la descente libre du centre de gravité de l'ensemble du marteau et du manche ;

h levée de ce centre de gravité ; h correspond au point où la came quitte le manche du marteau, point auquel doit commencer l'action du rabat.

Les marteaux frontaux marchant lentement, ils ne s'élèvent pas au delà du point où les cames les quittent; de sorte que, sauf le retard causé à la descente par la réaction du fer sous le marteau et par les frottements des tourillons de la hurasse, la durée d'inaction des cames peut être égale à $t = \sqrt{\frac{2h}{g}}$; mais, d'après les observations de Walter de Saint-Ange, dans la pratique, on fait varier cette durée, comme pour les marteaux à soulèvement, de $1,04t$ à $1,15t$.

Q étant le poids du volant, V sa vitesse à l'instant où la came quitte le marteau, et V' sa vitesse au moment où la came suivante commence son action, on doit avoir (30) :

$$\frac{Q}{2g}(V'^2 - V^2) = \mathcal{T} - \mathcal{T}'.$$

Comme on ne connaît pas les valeurs de V' et V, on établit entre elles et la valeur de la vitesse moyenne $v = \frac{2\pi rn}{60}$ (116) une relation dont il ne convient pas de s'écarter dans la pratique; ainsi l'on pose :

$$V' - V = \frac{v}{K},$$

et comme on peut supposer qu'on a :

$$V' + V = 2v,$$

multipliant ces deux équations membre à membre, il vient:

$$V'^2 - V^2 = \frac{2v^2}{K},$$

et par suite :

$$\frac{Q}{2g} \times \frac{2v^2}{K} = \frac{Qv^2}{gK} = \mathcal{T} - \mathcal{T}'.$$

K coefficient de régularité de vitesse, que, dans ce cas, on fait égal à 20, la grande régularité n'étant pas de rigueur (93).

C'est par des considérations analogues qu'on a établi les formules des n°s 93 et 94, et qu'on déterminerait le poids d'un volant dans un cas quelconque; quand toutefois on connaît les durées des actions et de leurs intervalles, et qu'on peut apprécier le travail absorbé pour chaque action : ainsi, pour les laminoirs, par exemple, ces données ne pouvant être posées d'une manière analytique, on ne peut donner qu'une formule empirique pour calculer le poids de leurs volants (120).

Le général Morin donne la formule suivante pour calculer le poids des volants pour marteaux :

$$P = \frac{K}{R^2}.$$

P poids de la jante du volant en kilogrammes ;
R rayon moyen de la jante du volant ;
K coefficient. Pour les marteaux frontaux K = 20000 ou 30000, selon que le poids des marteaux varie de 3000 à 3500 kilogrammes, ou de 4000 à 4900 kilogrammes. Pour les marteaux à l'allemande, conduits par un engrenage, dont le poids total, y compris le manche, la hurasse et les ferrures, varie ordinairement de 600 à 800 kilogrammes, et qui battent de 100 à 110 coups en une minute, le volant étant monté sur l'arbre à cames, K = 15000. Pour les martinets à engrenages, qui battent ordinairement de 150 à 200 coups à la minute, K = 6 000 ou 9 000, selon que le poids du martinet, y compris le manche et les ferrures, est 360 ou 500 kilogrammes.

120. *Le poids des volants de laminoirs, pour les grandes tôles et pour l'étirage des fers en barres, peut se calculer,* d'après le général Morin, *par la formule :*

$$P = \frac{130000 NK}{mv^2}.$$

P poids de la jante du volant en kilogrammes ;
N force en chevaux transmise par le moteur à l'arbre du volant ;
v vitesse moyenne de la jante du volant ;
m nombre de tours des cylindres en 1′ ;
K coefficient numérique qui est égal : 1° à 20 pour les machines de 80 à 100 chevaux faisant marcher à la fois 6 à 8 équipages de cylindres à tôle ou à fer en barres ; 2° à 25 pour les machines de 60 chevaux faisant marcher 4 à 6 équipages pour l'étirage des fers ; 3° à 80 pour les machines de 30 à 40 chevaux ne faisant marcher à la fois qu'un seul équipage de cylindres à grosses tôles, ou deux équipages de cylindres ébaucheurs et finisseurs pour les petits fers.

Les valeurs données pour K s'appliquent aux laminoirs conduits par des machines à vapeur, des roues à augets et des roues de côté ; mais pour les roues à aubes courbes ou à aubes planes, recevant l'eau en dessous, la vitesse étant très grande, on diminue un peu les valeurs précédentes de K.

121. Forces centripète et centrifuge (*Int.* 1654). Lorsqu'un mobile suit une circonférence ou seulement un arc de cercle, c'est qu'il est sollicité en chaque point de son mouvement par deux forces, l'une tangentielle à l'arc suivi, et l'autre dirigée vers le centre de cet arc.

La force tangentielle modifie seule la vitesse du mobile le long de l'arc suivi ; si elle est nulle, le mouvement est uniforme, et l'on peut admettre qu'il a été communiqué au mobile par une force qui a cessé d'agir. La direction de la seconde force lui a fait donner le nom de *force centripète ;* on l'appelle aussi *force infléchissante,* parce qu'à chaque instant elle infléchit la direction du mouvement, de manière à rendre ce mouvement circulaire, de rectiligne qu'il eût été sans son action.

Supposant, comme cela a souvent lieu dans la pratique, que la force centripète agit sur le mobile par l'intermédiaire d'un fil dont une extrémité est retenue au centre de la circonférence décrite, en vertu du principe de la réaction égale et contraire à l'action, le mobile exerce sur le point fixe une réaction égale et directement opposée à la force centripète, et que l'on nomme *force centrifuge.*

En supprimant la force centripète, ce qui peut se faire en coupant le fil ou en le rendant libre, la force centrifuge est supprimée aussi, et le mobile n'étant plus soumis qu'à la vitesse initiale, et à la force tangentielle, si celle-ci n'est pas nulle, il s'éloigne en suivant la tangente à la circonférence. Cet effet est mis parfaitement en évidence par la fronde.

Les forces centripète et centrifuge ont pour expression commune, abstraction faite du signe :

$$C = \frac{mv^2}{r} = \frac{Pv^2}{gr}.$$

C forces centripète ou centrifuge ;

m masse du corps en mouvement ;
v vitesse du centre de gravité du corps ;
r rayon de la circonférence décrite par le centre de gravité du corps ;
$P = mg$ poids du mobile (23).

122. Pendule simple (*Int.* 1665). La durée d'une oscillation du pendule simple est, lorsque l'amplitude est très petite :

$$T = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}. \qquad (a)$$

T durée de l'oscillation, c'est-à-dire du parcours simple de l'arc entier décrit ;
l longueur du pendule ;
g accélération de vitesse due à la pesanteur (18) dans le lieu où oscille le pendule.

Cette expression de la durée d'une très petite oscillation du pendule simple fait voir que, pour un même pendule ou pour des pendules de même longueur, les oscillations sont *isochrones*, c'est-à-dire de même durée, partout où la valeur de g est la même.

Pour un pendule d'une longueur l', oscillant dans un lieu où $g = g'$, on aurait :

$$T' = \pi \sqrt{\frac{l'}{g'}};$$

donc :

$$T : T' = \sqrt{\frac{l}{g}} : \sqrt{\frac{l'}{g'}}.$$

Lorsque $g = g'$, cette proportion devient :

$$T : T' = \sqrt{l} : \sqrt{l'};$$

et pour $l = l'$:

$$T : T' = \sqrt{\frac{1}{g}} : \sqrt{\frac{1}{g'}} = \sqrt{g'} : \sqrt{g}, = \sqrt{\frac{g'}{g}},$$

relations faciles à traduire verbalement.

Application. Quelle est la longueur du pendule simple qui bat les secondes à Paris ?

De la formule $T = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ on tire $l = \frac{gT^2}{\pi^2}$.

Remplaçant π, g et T par leurs valeurs, on a :

$$l = \frac{9{,}8088 \times 1 \times 1}{3{,}14159 \times 3{,}14159} = 0^m{,}99384.$$

On trouverait de même la longueur du pendule dont la très petite oscillation doit avoir une durée donnée.

Déterminant par une expérience la durée T de l'oscillation d'un pendule de longueur l, la formule (a) donne pour la valeur de g dans le lieu où l'on opère :

$$g = \frac{\pi^2 l}{T^2}.$$

123. Pendule conique (*fig.* 20) (*Int.* 1662). La durée d'une oscillation du pendule conique, c'est-à-dire le temps que met la boule à faire une révolution autour de l'axe, est :

Fig. 20.

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}. \qquad (1)$$

T durée de l'oscillation ; la formule fait voir qu'elle est double de celle du pendule simple de même longueur (122).

l longueur du pendule conique ; ce n'est pas la longueur de la tige du pendule, mais seulement la projection de cette tige sur la verticale ; nous l'appellerons hauteur du pendule.

L'isochronisme des oscillations a lieu dans les mêmes circonstances que pour le pendule simple, et les proportions posées au n° 122 se reproduisent également pour le pendule conique.

Ce qui vient d'être dit s'applique au cas où le pendule a plusieurs boules, comme à celui où il n'en a qu'une.

Suivant que T augmente ou diminue, la hauteur l augmente ou diminue, et l'on conçoit qu'on puisse utiliser l'oscillation qu'en subit le manchon inférieur, pour faire mouvoir l'organe qui introduit la vapeur dans le cylindre d'une machine à vapeur, ou l'eau sur une roue hydraulique, et, par suite, régler la force motrice de manière à obtenir une vitesse que l'on peut considérer comme constante dans la pratique.

Le poids de chacune des boules d'un pendule conique est donné par la formule :

$$P = \frac{pa(bh + al)(n-1)^2}{(2n-1)2b^2h}. \qquad (2)$$

P poids d'une boule ;

p force qu'il faut appliquer au manchon inférieur, au repos et avant que les boules ne soient en place, pour le soulever ainsi que les tiges quand il est dans la position qui correspond à la vitesse de régime, pour laquelle on a : $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$.

On détermine p au moyen d'une balance, ou d'un fil très-flexible passant sur une petite poulie très mobile ; p comprend aussi l'effort à produire sur le manchon pour manœuvrer la soupape régulatrice ;

a distance du point d'oscillation supérieur au point où les tiges supérieures s'articulent avec les tiges inférieures, mesurée sur les tiges mêmes ;

b longueur totale de chacune des tiges supérieures : ordinairement $\frac{a}{b} = \frac{2}{3}$ environ ;

h projection de chacune des tiges inférieures sur la verticale ;

l hauteur du pendule ou projection de b sur la verticale ;

n coefficient de latitude de durée d'oscillation avant que le pendule ne modère la vitesse de la machine.

La durée d'oscillation correspondant à la vitesse de régime de la machine étant :

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}, \quad \text{d'où :} \quad l = \frac{gT^2}{4\pi^2},$$

la formule précédente (2) donne le poids de chaque boule nécessaire pour que le pendule agisse sur la soupape régulatrice dès que la durée d'oscillation est :

$$T' = T\,\frac{(n-1)}{n},$$

ce qui donne

$$l' = \frac{g\,T^2\,\dfrac{(n-1)^2}{n^2}}{4\,\pi^2}.$$

La valeur de n dépend de la nature du travail à produire, elle est ordinairement comprise entre 10 et 20.

A l'aide d'une épure, on détermine la quantité dont s'élève le manchon par la différence $l - l'$ des hauteurs du pendule.

On obtient la vitesse correspondant à T au moyen d'une poulie fixée au pendule, à laquelle on transmet le mouvement à l'aide d'une corde ou d'une courroie sans fin qui communique avec l'arbre de la machine.

Quand les tiges du pendule forment entre elles un parallélogramme, disposition qu'il convient d'adopter quand rien ne s'y oppose, on a $bh = al$, et la formule qui donne le poids d'une boule devient :

$$P = \frac{pa(n-1)^2}{b(2n-1)}.$$

Pour $p = 2^{kg}$, $\frac{a}{b} = \frac{2}{3}$ et $n = 20$, cette dernière formule donne $P = 12^{kg},27$.

Dans l'établissement de ces formules qui donnent la valeur de P, on a négligé l'effet de la force centrifuge sur les tiges, les résultats obtenus sont donc un peu faibles.

Dans la pratique, on peut faire les boules creuses et y introduire peu à peu de la grenaille de plomb que l'on fait fondre quand le poids de la boule est tel que la soupape régulatrice fonctionne dès qu'on a :

$$T' = T\,\frac{n-1}{n}.$$

Fig. 21.

Ordinairement, le poids des boules est compris entre 10 et 35 kilogr. Suivant qu'une machine est de 6, 10, 15 ou 25 chevaux, le diamètre des boules est de $0^m,115$, $0^m,135$, $0^m,15$ et $0^m,16$ environ. Il n'y a pas en général d'inconvénient à faire les boules un peu fortes.

124. Treuil régulateur. Le rayon à donner au treuil (*fig.* 21), au point correspondant à la position d'une spire quelconque de la corde qui s'enroule, pour que l'effort à produire pour manœuvrer le treuil reste constant, malgré la plus ou moins grande longueur de corde déroulée, est

donné par la formule :

$$r+e=\frac{PB}{Q+pl}.$$

r rayon cherché ;
e rayon de la corde ;
P force motrice ;
B bras de levier de la force motrice ;
Q poids élevé ;
p poids du mètre de longueur de corde ;
l longueur de corde déroulée.

La corde venant toujours se placer à côté d'elle-même à mesure qu'elle s'enroule, dès qu'on a son diamètre, on connaît à très peu près les positions des différentes spires suivant la longueur de l'axe du treuil, en portant successivement le diamètre de la corde sur cet axe.

La longueur de corde déroulée après un nombre quelconque n de révolutions du treuil est :

$$l_n=L-2\pi[ne+(r_1+r_2+r_3+\ldots+r_n)].$$

l_n longueur de corde déroulée ;
L longueur totale de la corde ;
n nombre des spires qui se trouvent sur le treuil ;
$r_1, r_2, r_3\ldots r_n$ rayons du treuil correspondant à la 1re, 2e, 3e... n^e spire.

Comme, théoriquement, le treuil régulateur différerait très peu d'un tronc de cône, dans la pratique on se contente de cette forme, dont le petit et le grand rayon se tirent des formules :

$$r+e=\frac{PB}{Q+pL},\quad R+e=\frac{PB}{Q}.$$

r petit rayon du treuil ;
R grand rayon du treuil.

Pour l'exploitation des mines, on fait usage du treuil régulateur, et afin de ne pas perdre de temps pendant sa manœuvre, on emploie deux cordes, dont l'une s'enroule et monte la charge pendant que l'autre se déroule et descend à vide. Cette disposition exige l'emploi de deux treuils semblables à celui de la figure 21, montés sur le même axe, accolés par leurs grandes bases, et dont les rayons sont calculés d'après les considérations suivantes :

1° Quand un fardeau est en bas, sa corde est complètement déroulée, tandis que l'autre est entièrement enroulée et non chargée ; on a donc :

$$PB=(Q+pL)\ (r+e),\quad \text{d'où}\quad r+e=\frac{PB}{Q+pL}.$$

2° Pour le fardeau qui arrive en haut, la corde est complètement enroulée, tandis que l'autre est entièrement déroulée ; on a donc :

$$PB=Q(R+e)-pL(r+e);$$

d'où l'on tire, en remplaçant $r+e$ par sa valeur (1°) :

$$R+e=\frac{PB}{Q}+\frac{pLPB}{Q(Q+pL)}=\frac{PB}{Q}\left(1+\frac{pL}{Q+pL}\right).$$

r petit rayon de chaque treuil ;
R grand rayon de chaque treuil.

On fait encore usage d'un autre genre de treuil appelé *bobine*, dans lequel la corde, qui est plate, ou la courroie s'enroule sur elle-même, de manière qu'après chaque tour son épaisseur s'ajoute au rayon de la bobine, c'est-à-dire au bras de levier de la résistance. Comme il est impossible de bien régulariser cette machine, nous nous contenterons de la citer.

125. Sonnette à tiraudes. Le tableau du n° 37 fait voir que l'effet maximum fourni par l'homme employé dans les circonstances de cette machine correspond à un effort de 18 kilogr., à une vitesse moyenne de $0^m,20$ par seconde, et à une durée de travail journalière de 6 heures. Dans les chantiers de construction, la durée de travail est de 9 à 10 heures par jour; mais comme un tiers à peu près de ce temps est employé à disposer les appareils, on peut considérer 6 heures comme étant la durée du travail effectif journalier.

La manœuvre de la sonnette à tiraudes étant très fatigante, on ne bat de suite que 20 à 25 coups de mouton; comme il faut 1′ 20″ pour cela, qu'ensuite on se repose pendant le même temps, et que le temps perdu est de 20″ environ, chaque volée exige 3 minutes.

A la construction du pont d'Iéna, on travaillait 10 heures par jour, la levée du mouton était de $1^m,45$, on donnait moyennement 12 volées de chacune 30 coups à l'heure, le mouton pesait 587 kilogr., et il était manœuvré par 38 hommes. De ces données, il résulte que l'effort produit par chaque homme était seulement de $15^{kg},45$, avec une vitesse moyenne de $0^m,145$ par seconde; mais cela en négligeant les frottements de l'axe de la poulie, la raideur de la corde et l'effet de l'obliquité des divers cordons tirés par un aussi grand nombre d'hommes; de plus, la levée $1^m,45$ étant un peu forte, l'effet produit par les hommes devait en être diminué; il convient que la levée du mouton soit comprise entre $1^m,30$ et $1^m,40$.

Un mouton à enfoncer les pilotis doit peser au moins 300 kilogr., et sa levée ne doit pas être inférieure à $1^m,10$ ou $1^m,30$; il est manœuvré par 18 à 20 hommes. Les moutons du poids de 600 kilogr. sont manœuvrés par 35 ou 40 hommes (*Art.* 318).

126. Sonnette de déclic. Pour la sonnette à déclic, la puissance est donnée par la formule :

$$P=(Q+q+q')\frac{r'''r'}{r''r}.$$

P puissance agissant sur la manivelle ;
r rayon de la manivelle ;
r' rayon du pignon monté sur l'arbre de la manivelle ;

r'' rayon de la roue d'engrenage montée sur l'arbre du treuil, et avec laquelle s'engrène le pignon de rayon r' ;
r''' rayon du treuil ;
Q poids du mouton ;
q résistance due à la raideur de la corde sur la poulie (62) ;
q' résistance due à la raideur de la corde sur le treuil.

On a dans cette formule négligé le frottement des axes et des engrenages, dont on tiendrait facilement compte (60 et 82).

Une équipe de sonnette à déclic se compose ordinairement de 6 hommes au treuil et d'un charpentier arrimeur, et elle frappe à très peu près un coup par minute lorsque le mouton est élevé à des hauteurs variant de $0^m,30$ à $4^m,45$ au-dessus de la tête des pieux.

Ce genre de sonnette est surtout avantageux quand il s'agit de manœuvrer de lourds moutons, ceux de 400 à 600 kilogr.

La sonnette à tiraudes s'emploie ordinairement avec avantage pour enfoncer des pieux dans les terrains faciles, comme ceux qui sont vaseux par exemple, et aussi pour enfoncer les pieux de peu de longueur et les palplanches. Quand, au contraire, les pieux sont longs, que l'enfoncement se fait dans des terrains très fermes ou de sable fin, il y a tout avantage à employer la sonnette à déclic mue à bras d'hommes ou mieux par une machine à vapeur (*Art.* 318).

127. Battage des pieux. L'expérience prouve que l'enfoncement des pieux est proportionnel au produit de la masse du mouton, plus la masse du pieu, par le carré de la vitesse commune de ces deux masses après le choc, c'est-à-dire à :

$$(m+m')u^2 = (m+m')\frac{m^2v^2}{(m+m')^2} = \frac{m^2v^2}{m+m'}. \qquad (98)$$

Ayant $v^2 = 2gh$ (19), l'enfoncement est donc proportionnel à :

$$\frac{2gm^2h}{m+m'} = \frac{2gmh}{1+\frac{m'}{m}}.$$

u vitesse commune au mouton et au pieu après le choc ;
v vitesse du mouton avant le choc ;
m masse du mouton ;
m' masse du pieu ;
h levée du mouton.

L'expression $\frac{2gm^2h}{m+m'}$ fait voir que, pour une même masse de mouton, l'enfoncement d'un même pieu est proportionnel à la levée du mouton, et l'expression $\frac{2gmh}{1+\frac{m'}{m}}$ montre que, pour un même produit mh, l'effet est d'autant plus grand que la masse m est plus grande, et que, par conséquent, pour l'économie du travail, qui est représentée par mh, il faudra prendre de gros moutons, qu'on élèvera à une hauteur modérée de $2^m,50$

à 3 ou 4 mètres. Pour les derniers coups frappés sur un pieu, on peut porter la hauteur h à 5 ou 6 mètres.

Un pieu de $0^m,23$ de diamètre ne doit pas être chargé de plus de 25 000 kilogr., et un pieu de $0^m,33$ de diamètre de plus de 50 000 kilogr.; c'est à peu près 60 kilogr. par centimètre carré de la section du pieu.

On peut admettre que les pieux enfoncés obliquement présentent une résistance qui est à celle des pieux enfoncés verticalement comme le sinus de leur inclinaison est à l'unité.

Le *refus* d'un pieu indique la limite de son enfoncement; cette limite est ordinairement basée sur le poids dont il doit être chargé, et une longue expérience a démontré que pour des charges *extraordinaires et maxima*, comme celle de 25 000 kilogr. par pieu de $0^m,23$ de diamètre à la tête ou de 50 000 kilogr. par pieu de $0^m,33$, le refus est obtenu lorsque l'enfoncement du pieu n'est plus que de $0^m,0045$ par volée de 25 coups d'un mouton de 300 kilogr. tombant de $1^m,30$ de hauteur, ou lorsque cet enfoncement n'est plus que de $0^m,01$ environ par volée de 10 coups d'un mouton de 600 kilogr. tombant de $3^m,60$ de hauteur, refus équivalent à très peu près à celui obtenu sous une volée de 30 coups avec un mouton du même poids de 600 kilogr. tombant seulement de $1^m,20$ de hauteur. Au pont de Neuilly, où les pieux avaient à supporter jusqu'à 52000 kilogr. pour un diamètre de $0^m,325$, on cessait le battage quand l'enfoncement n'était plus que de $0^m,0045$ par volée de 25 coups d'un mouton tombant de $1^m,40$.

Lorsque les pieux de $0^m,33$ de diamètre en tête ne doivent supporter que des charges de 8 000 à 10000 kilogr. chacun, on admet qu'ils sont battus à un refus suffisant lorsque leur enfoncement n'est plus que de $0^m,03$, $0^m,04$ ou $0^m,05$ pour une des volées précédentes, si toutefois on est sûr que les pieux ont pénétré dans le sol résistant.

En général on ne doit pas chercher à obtenir un refus exagéré, dont les conséquences sont assez souvent la rupture ou le broyage des pieux dans leur alvéole, surtout quand leur longueur de fiche est supérieure à 8 ou 10 mètres.

Il résulte, de plusieurs expériences, qu'avec des moutons du poids de 500 à 600 kilogr., le prix du battage des pieux, toutes choses égales d'ailleurs, est proportionnel aux nombres suivants :

Battage à la sonnette à tiraudes.	1,00
id. à la sonnette à déclic à bras d'hommes.	0,75
id. à la sonnette à déclic mue par une locomobile, le nombre des pieux étant de 150 au moins. . .	0,40

128. Manège. En supposant que dans un manège une résistance agisse tangentiellement à un tambour horizontal, comme cela a lieu généralement, et que sur l'arbre de ce tambour soit monté un pignon conique qui engrène avec une roue conique montée sur l'arbre vertical du manège, le travail dépensé par la puissance appliquée à l'extrémité des flèches est égal au travail absorbé par la résistance tangentielle au tambour, par le frottement des tourillons de ce tambour, par celui des

engrenages et par celui des tourillons de l'arbre vertical; pour une révolution du manège, l'équilibre dynamique donne :

$$P \times 2\pi R = Q'f \times 2\pi r + Q''f \times \frac{4}{3}\pi r +$$
$$\frac{R'}{R''}\left[Qf \times 2\pi r' + F \times 2\pi R''' + (Qf \times 2\pi r' + F \times 2\pi R''')f'\pi\left(\frac{1}{n} + \frac{1}{n'}\right)\right].$$

P puissance agissant à l'extrémité des flèches ;
R bras de levier de la puissance, ou longueur des flèches ;
Q somme moyenne des pressions sur les tourillons de l'arbre vertical ; on calculera la pression sur chaque tourillon en opérant comme pour le treuil (76) ; mais comme cette pression varie pour chaque position de la puissance, on prendra une moyenne entre sa plus grande et sa plus petite valeur ;
r rayon des tourillons de l'arbre vertical ;
f coefficient de frottement, que l'on suppose commun à tous les tourillons ainsi qu'à la face horizontale du pivot inférieur de l'arbre vertical ;
Q'' pression de la face horizontale du pivot inférieur de l'arbre vertical sur la crapaudine ;
R' rayon de la roue conique montée sur l'arbre du manège ;
R'' rayon du pignon conique monté sur l'arbre du tambour ;
R''' rayon du tambour, plus celui de la corde ;
Q somme des pressions des deux tourillons de l'arbre du tambour sur leurs coussinets (76) ;
r' rayon des tourillons de l'arbre du tambour ;
F résistance agissant tangentiellement au tambour ; elle se compose du poids élevé, du poids de la corde et de la raideur de cette corde ;
f' coefficient de frottement des engrenages ;
n nombre de dents du pignon ;
n' nombre de dents de la roue ;
$P \times 2\pi r$ travail dépensé par la puissance : ce travail et les suivants sont pris pour une révolution du manège ;
$Q'f \times 2\pi r$ travail absorbé par le frottement latéral des pivots de l'arbre du manège ;
$Q''f \times \frac{4}{3}\pi r$ travail absorbé par le frottement de la face horizontale du pivot inférieur de l'arbre du manège (60) ;
$\frac{R'}{R''} Qf \times 2\pi r'$ travail absorbé par le frottement des tourillons de l'arbre du tambour pour une révolution du manège ;
$\frac{R'}{R''} F \times 2\pi R'''$ travail absorbé par la résistance F agissant tangentiellement au tambour ;
$\frac{R'}{R''}(Qf \times 2\pi r' + F \times 2\pi R''')f'\pi\left(\frac{1}{n} + \frac{1}{n'}\right)$ travail absorbé par le frottement des engrenages (82 et 83).

En négligeant tous les frottements, ainsi que le poids et la raideur de la corde, l'équilibre dynamique donnerait, pour une révolution du manège :

$$P \times 2\pi R = \frac{R'}{R''} F' \times 2\pi R''', \quad \text{d'où} \quad P = F' \frac{R'R'''}{RR''}.$$

F' poids élevé par la corde qui s'enroule sur le tambour.

Le rayon d'un manège ne doit pas être inférieur à $2^m,50$, et il convient de lui donner de 3 à 4 mètres.

129. Chevaux de manège, soins à leur donner. Les chevaux courts et trapus conviennent pour le manège. Leur taille, mesurée sur le garrot, peut varier de $1^m,45$ à $1^m,55$.

Un cheval moyen peut produire une traction de 360 kilogr. quand il ne prend aucune vitesse; mais quand il marche, la traction qu'il peut produire n'est que le 1/4 environ de cette quantité; on compte sur 80 à 90 kilogr. au maximum pour une vitesse moyenne de 1 mètre par seconde, et pour un temps qui n'est pas trop prolongé. Le plus souvent, les chevaux employés au manège étant fatigués et presque usés, ils ne produisent qu'une traction de 40 à 50 kilogr. avec une vitesse de $0^m,90$ à 1 mètre par seconde (36 à 39).

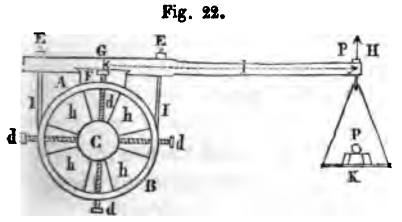
Le travail ne doit pas avoir une durée de plus de 3 heures, et il doit être suivi d'un repos d'une durée au moins égale. Dans un travail continu, le repos doit être de 4 heures pour 2 heures de travail, ce qui fait 8 heures de travail effectif par jour.

Les heures de repos et de pansage des chevaux doivent être régulières. Leur nourriture doit être peu échauffante; aussi ne leur donne-t-on que peu d'avoine. Ils mangent ordinairement, en 24 heures, 10 kilogr. de foin et 4 à 5 kilogr. de son; mais il serait plus convenable de leur donner 5 kilogr. de foin, 5 kilogr. de paille et 8 litres d'avoine. Le foin doit être vert, d'une odeur agréable légèrement aromatique, et d'une saveur douce et sucrée; il doit être fin, sec et assez flexible; on doit préférer le foin de plaine ou de terrains légèrement inclinés à celui des marais, qui est malsain; il doit, autant que possible, être consommé de 2 mois à 2 ans après la récolte. La paille de froment non barbu est la meilleure comme nourriture; elle doit être nouvelle et de couleur jaune doré. L'avoine doit être pesante, lisse, sans mauvaise odeur, bien nettoyée; sa couleur est indifférente; elle doit peser au moins 42 kilogr. l'hectolitre si elle est nouvelle, et 40 kilogr. si elle est déjà vieille; elle ne doit être donnée aux chevaux qu'après 4 à 5 mois de récolte.

L'eau doit être donnée aux chevaux à la température de l'atmosphère; celle de pluie ou de rivière est la meilleure; on doit rejeter celle qui est croupie et celle qui ne dissout pas le savon.

130. Frein dynamométrique de Prony (*fig.* 22). Cet appareil sert à déterminer la puissance d'une machine, ou le travail absorbé par les différents appareils que commande l'arbre moteur de cette machine, en le remplaçant par le travail, facile à évaluer, absorbé par un simple frottement produit sur cet arbre.

Fig. 22.



AB bague en fonte, que l'on centre sur l'arbre moteur C au moyen des vis *d*, *d*,...;
h,*h*,... cales fixant la bague AB sur l'arbre C;
E, E écrous servant à serrer la bague AB entre le coussinet F fixé au levier GH, et le lien en fer II;
K plateau de balance fixé à l'extrémité du levier GH.

Supposons qu'après avoir assujetti le levier GH dans une position horizontale, on serre la bague AB entre le coussinet F et le lien II; la vitesse de rotation de l'arbre C ira en diminuant à mesure que le serrage augmentera, et finira par atteindre la vitesse de régime; alors, le travail absorbé par le frottement de la bague AB sera égal au travail absorbé par les différents appareils que commandait l'arbre C. Si maintenant on rend libre le levier GH, il sera entraîné par le frottement de la bague AB, et tournera avec l'arbre C; mais si l'on place dans le plateau K un poids P tel que le levier GH ne soit plus entraîné et ne fasse qu'osciller légèrement de dessus en dessous de la position horizontale, le travail absorbé par le frottement de la bague AB sera encore égal au travail absorbé par la force $P + p$ agissant à l'extrémité du levier l, et l'on aura, pour une révolution de l'arbre C :

$$\mathcal{T}_u = F \times 2\pi r = (P + p)2\pi l.$$

$\mathcal{T}_u$ travail transmis par l'arbre moteur C, ou travail absorbé par les différents appareils que commande cet arbre ;
F frottement de la bague AB contre le coussinet F et le lien II ;
P poids placé dans le plateau K ;
p force verticale qu'il faut appliquer au point H pour maintenir le levier GH dans une position horizontale quand il repose en G sur un couteau ordinaire de balancier ; on détermine p au moyen d'une balance ou d'un fil flexible passant sur une poulie très mobile.

Tout est connu dans l'expression $(P + p)2\pi l$, on connaît donc $\mathcal{T}_u$.

Application. Soit $p = 30$ kil., $P = 100$ kil. et $l = 2^m,50$; il s'agit de déterminer le travail transmis par l'arbre moteur en chevaux-vapeur, sachant que cet arbre fait 40 révolutions par minute.

On a, pour une révolution, en remplaçant les lettres par leurs valeurs :

$$\mathcal{T}_u = (100 + 30) \times 2 \times 3,14 \times 2,50 = 2041 \text{ kilogrammètres},$$

et pour une seconde :

$$\mathcal{T}_u = 2041 \frac{40}{60} = 1\,360^{km},66.$$

La force de la machine est donc de :

$$\frac{1\,360,66}{75} = 18,14 \text{ chevaux-vapeur}.$$

Quand on n'a pas de bague à sa disposition, et que l'arbre moteur est cylindrique, on peut produire le frottement directement sur l'arbre si son diamètre est suffisant. On remplace quelquefois le lien en fer II par un morceau de bois, que l'on creuse un peu afin qu'il frotte par une plus grande surface.

Les surfaces frottantes doivent avoir une certaine étendue, afin que la pression n'atteigne pas la limite qui pourrait les altérer. Pour une force de 6 à 8 chevaux, il convient que l'arbre ou la bague, faisant 20

à 30 tours par minute, ait $0^m,16$ de diamètre; pour une force de 15 à 25 chevaux, il convient que, pour 15 à 30 tours, ce diamètre varie de $0^m,30$ à $0^m,40$, et pour une force de 40 à 70 chevaux, ce diamètre doit varier de $0^m,65$ à $0^m,80$ pour une vitesse de 15 à 30 tours par minute.

L'arbre ou la bague doit être parfaitement cylindrique, et l'on doit avoir soin de roder pendant quelque temps les surfaces frottantes l'une sur l'autre; sans cela le frein n'avancerait sur l'arbre que par secousses, et il ne donnerait que des résultats incertains.

Nous avons eu occasion de faire usage du frein de Prony dans un cas où l'arbre faisait 120 tours par minute. Le frein a fonctionné avec une très grande régularité; ses oscillations étaient presque insensibles; mais, au moindre arrêt de l'arbre, l'adhésion du frein sur la bague devenait telle, qu'on était obligé de desserrer le frein pour permettre le mouvement. Un filet abondant d'eau de savon noir rafraîchissait et lubrifiait les parties frottantes. La puissance mesurée par le frein était de 2 chevaux et demi.

Le général Morin avait déjà constaté, par des expériences faites au Bouchet, que le frein de Prony fonctionne d'une manière favorable à de grandes vitesses.

ÉCOULEMENT DE L'EAU

131. (*Int.* 1715 à 1737, voir l'équilibre des fluides et des corps plongeants, et les moyens de mesurer la pression des fluides.) Le *mouvement* d'un fluide est dit *permanent* (le *régime* est *permanent*), lorsque les hauteurs des niveaux ou mieux les pressions, les aires des sections transversales et les vitesses du fluide en chacun des points de ces sections sont constantes.

De la nature propre des fluides, les molécules étant contiguës les unes aux autres sans interruption, ce qu'on exprime en disant qu'il y a *continuité du fluide*, il résulte que pour les liquides que l'on peut considérer comme étant incompressibles (*Deuxième partie*), il passe dans chaque section le même volume de fluide à chaque instant quand le régime est permanent.

Pour les gaz, la permanence du mouvement exige bien, comme pour les liquides, que le même poids de fluide passe dans chaque tranche dans le même temps; mais les pressions étant variables d'une section à une autre, il en résulte que les volumes écoulés sont variables pour chaque tranche.

132. Hypothèse du parallélisme des tranches. Afin de pouvoir analyser les phénomènes de l'écoulement des fluides, on a été obligé de supposer le parallélisme des tranches, c'est-à-dire d'admettre que tout volume fluide est composé de tranches très minces, normales à la di-

rection du mouvement du fluide, se mouvant en restant constamment parallèles à elles-mêmes, conservant toujours le même volume, et ne faisant que s'élargir on se rétrécir suivant que le vase dans lequel elles se meuvent s'élargit ou se rétrécit. La vitesse du fluide est supposée être la même en tous les points de chaque section.

On conçoit que ces hypothèses ne sont à peu près réalisées que dans le cas où le fluide se meut dans des vases, des canaux ou des tuyaux de conduite dont la forme continue et régulière ne varie que par degrés insensibles.

133. Supposant que les parois du vase sont continues et tellement raccordées avec l'orifice d'écoulement que l'on puisse, si cela était entièrement possible, considérer le parallélisme des tranches comme réalisé, on prouve théoriquement (*Int.* 1739) que le niveau restant constant dans le vase, d'où naît la permanence du mouvement, on a :

$$v = \sqrt{2gh}, \quad \text{d'où} \quad h = \frac{v^2}{2g}.$$

v vitesse d'écoulement ;
h *hauteur génératrice* ou *hauteur de chute ;* c'est la hauteur du niveau du liquide dans le vase au-dessus du centre de gravité de l'orifice.

Écoulement en mince paroi. Lorsque l'écoulement a lieu en mince paroi, c'est-à-dire quand l'épaisseur de la paroi dans laquelle est pratiqué l'orifice d'écoulement est moindre que la plus petite dimension de l'orifice, et au maximum de $0^m,05$ à $0^m,06$, la vitesse avec laquelle l'eau s'écoule est, comme dans le cas précédent, très sensiblement donnée par la formule de Toricelli, disciple de Galilée :

$$v = \sqrt{2gh}.$$

v doit être appelé *vitesse théorique ;* la *vitesse réelle* est moindre, mais seulement de 0,01 à 0,02 de v. Cette diminution de vitesse est due au frottement de l'eau contre les parois de l'orifice et à la résistance de l'air.

La formule fait voir que dans les cas précédents d'écoulement de l'eau, la vitesse théorique est celle qu'acquerrait un corps en tombant dans le vide de la hauteur h (19).

Nous donnons ci-après une table des vitesses théoriques correspondant à diverses hauteurs de chute. Ainsi qu'on peut le vérifier, les résultats numériques sont tels que l'on peut interpoler rapidement pour calculer des valeurs intermédiaires. Pour les applications dans lesquelles on cherche à s'assurer d'un débit imposé à l'avance, il faut augmenter comme il est dit ci-dessus la vitesse donnée par la table d'un à deux centièmes de sa valeur afin d'obtenir la hauteur de chute nécessaire au débit qu'on se propose d'obtenir. Ainsi, pour obtenir une vitesse de $0^m,44$ par seconde, on devra prendre dans la table la vitesse $0^m,44$ augmentée des 0,02 de $0^m,44$, c'est-à-dire $0^m,4488$ ou environ $0^m,46$.

Table des vitesses théoriques $v = \sqrt{2gh}$ *correspondant à différentes hau*
de chute (Int. 1473).

HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.	HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.	HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.	HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.	HAUTEURS de chute.	VITESSES
m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.	m
0,001	0,140	0,45	2,971	0,98	4,384	1,51	5,443	2,04	6,3
0,002	0,198	0,46	3,004	0,99	4,407	1,52	5,461	2,05	6,3
0,003	0,243	0,47	3,037	1,00	4,429	1,53	5,479	2,06	6,3
0,004	0,280	0,48	3,069	1,01	4,451	1,54	5,496	2,07	6,3
0,005	0,313	0,49	3,100	1,02	4,473	1,55	5,514	2,08	6,3
0,006	0,343	0,50	3,132	1,03	4,495	1,56	5,532	2,09	6,4
0,007	0,370	0,51	3,163	1,04	4,517	1,57	5,550	2,10	6,4
0,008	0,395	0,52	3,194	1,05	4,539	1,58	5,567	2,11	6,4
0,009	0,420	0,53	3,224	1,06	4,560	1,59	5,585	2,12	6,4
0,01	0,443	0,54	3,253	1,07	4,582	1,60	5,603	2,13	6,4
0,02	0,626	0,55	3,285	1,08	4,603	1,61	5,620	2,14	6,4
0,03	0,767	0,56	3,314	1,09	4,624	1,62	5,637	2,15	6,4
0,04	0,886	0,57	3,344	1,10	4,645	1,63	5,655	2,16	6,5
0,05	0,990	0,58	3,373	1,11	4,666	1,64	5,672	2,17	6,5
0,06	1,085	0,59	3,402	1,12	4,687	1,65	5,690	2,18	6,5
0,07	1,172	0,60	3,431	1,13	4,708	1,66	5,707	2,19	6,5
0,08	1,253	0,61	3,459	1,14	4,729	1,67	5,724	2,20	6,5
0,09	1,329	0,62	3,488	1,15	4,750	1,68	5,741	2,21	6,5
0,10	1,401	0,63	3,516	1,16	4,770	1,69	5,758	2,22	6,5
0,11	1,468	0,64	3,543	1,17	4,790	1,70	5,775	2,23	6,6
0,12	1,534	0,65	3,571	1,18	4,811	1,71	5,792	2,24	6,6
0,13	1,597	0,66	3,598	1,19	4,831	1,72	5,809	2,25	6,6
0,14	1,657	0,67	3,625	1,20	4,852	1,73	5,826	2,26	6,6
0,15	1,715	0,68	3,652	1,21	4,872	1,74	5,842	2,27	6,6
0,16	1,772	0,69	3,679	1,22	4,892	1,75	5,859	2,28	6,6
0,17	1,826	0,70	3,706	1,23	4,913	1,76	5,876	2,29	6,7
0,18	1,879	0,71	3,732	1,24	4,933	1,77	5,893	2,30	6,7
0,19	1,931	0,72	3,758	1,25	4,953	1,78	5,909	2,31	6,7
0,20	1,981	0,73	3,784	1,26	4,972	1,79	5,926	2,32	6,7
0,21	2,030	0,74	3,810	1,27	4,991	1,80	5,942	2,33	6,7
0,22	2,078	0,75	3,836	1,28	5,011	1,81	5,959	2,34	6,7
0,23	2,124	0,76	3,861	1,29	5,031	1,82	5,975	2,35	6,7
0,24	2,170	0,77	3,886	1,30	5,050	1,83	5,992	2,36	6,8
0,25	2,215	0,78	3,911	1,31	5,069	1,84	6,008	2,37	6,8
0,26	2,259	0,79	3,936	1,32	5,089	1,85	6,024	2,38	6,8
0,27	2,301	0,80	3,961	1,33	5,108	1,86	6,041	2,39	6,8
0,28	2,344	0,81	3,986	1,34	5,127	1,87	6,057	2,40	6,8
0,29	2,385	0,82	4,011	1,35	5,146	1,88	6,073	2,41	6,8
0,30	2,426	0,83	4,035	1,36	5,165	1,89	6,089	2,42	6,8
0,31	2,466	0,84	4,059	1,37	5,184	1,90	6,105	2,43	6,8
0,32	2,506	0,85	4,083	1,38	5,203	1,91	6,122	2,44	6,9
0,33	2,544	0,86	4,107	1,39	5,222	1,92	6,138	2,45	6,9
0,34	2,582	0,87	4,131	1,40	5,241	1,93	6,154	2,46	6,9
0,35	2,620	0,88	4,155	1,41	5,259	1,94	6,170	2,47	6,9
0,36	2,658	0,89	4,178	1,42	5,278	1,95	6,186	2,48	6,9
0,37	2,694	0,90	4,202	1,43	5,297	1,96	6,202	2,49	6,9
0,38	2,730	0,91	4,225	1,44	5,315	1,97	6,217	2,50	7,0
0,39	2,766	0,92	4,248	1,45	5,333	1,98	6,232	2,51	7,0
0,40	2,801	0,93	4,271	1,46	5,351	1,99	6,248	2,52	7,0
0,41	2,836	0,94	4,294	1,47	5,370	2,00	6,264	2,53	7,0
0,42	2,870	0,95	4,317	1,48	5,388	2,01	6,279	2,54	7,0
0,43	2,904	0,96	4,340	1,49	5,406	2,02	6,295	2,55	7,0
0,44	2,938	0,97	4,362	1,50	5,425	2,03	6,311	2,56	7,0

HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.	HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.	HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.	HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.	HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.
m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.
2,57	7,101	3,14	7,849	3,71	8,531	4,28	9,163	4,85	9,754
2,58	7,114	3,15	7,861	3,72	8,543	4,29	9,174	4,86	9,764
2,59	7,128	3,16	7,873	3,73	8,554	4,30	9,185	4,87	9,774
2,60	7,142	3,17	7,886	3,74	8,566	4,31	9,195	4,88	9,784
2,61	7,156	3,18	7,898	3,75	8,577	4,32	9,206	4,89	9,794
2,62	7,169	3,19	7,911	3,76	8,588	4,33	9,217	4,90	9,804
2,63	7,183	3,20	7,923	3,77	8,600	4,34	9,227	4,91	9,814
2,64	7,197	3,21	7,936	3,78	8,611	4,35	9,238	4,92	9,824
2,65	7,210	3,22	7,948	3,79	8,623	4,36	9,248	4,93	9,834
2,66	7,224	3,23	7,960	3,80	8,634	4,37	9,259	4,94	9,844
2,67	7,237	3,24	7,973	3,81	8,645	4,38	9,270	4,95	9,854
2,68	7,251	3,25	7,985	3,82	8,657	4,39	9,280	4,96	9,864
2,69	7,265	3,26	7,997	3,83	8,668	4,40	9,291	4,97	9,874
2,70	7,278	3,27	8,009	3,84	8,679	4,41	9,301	4,98	9,884
2,71	7,291	3,28	8,022	3,85	8,691	4,42	9,312	4,99	9,894
2,72	7,305	3,29	8,034	3,86	8,702	4,43	9,322	5,00	9,904
2,73	7,318	3,30	8,046	3,87	8,713	4,44	9,333	5,25	10,149
2,74	7,332	3,31	8,058	3,88	8,725	4,45	9,343	5,50	10,387
2,75	7,345	3,32	8,070	3,89	8,736	4,46	9,354	5,75	10,621
2,76	7,358	3,33	8,082	3,90	8,747	4,47	9,364	6,00	10,849
2,77	7,372	3,34	8,095	3,91	8,758	4,48	9,375	6,25	11,073
2,78	7,385	3,35	8,107	3,92	8,769	4,49	9,385	6,50	11,292
2,79	7,398	3,36	8,119	3,93	8,780	4,50	9,396	6,75	11,507
2,80	7,411	3,37	8,131	3,94	8,792	4,51	9,406	7,00	11,718
2,81	7,425	3,38	8,143	3,95	8,803	4,52	9,417	7,25	11,926
2,82	7,437	3,39	8,155	3,96	8,814	4,53	9,427	7,50	12,130
2,83	7,451	3,40	8,167	3,97	8,825	4,54	9,437	7,75	12,330
2,84	7,464	3,41	8,179	3,98	8,836	4,55	9,448	8,00	12,528
2,85	7,477	3,42	8,191	3,99	8,847	4,56	9,458	8,25	12,722
2,86	7,490	3,43	8,203	4,00	8,858	4,57	9,468	8,50	12,913
2,87	7,503	3,44	8,215	4,01	8,869	4,58	9,479	8,75	13,102
2,88	7,517	3,45	8,227	4,02	8,880	4,59	9,489	9,00	13,288
2,89	7,530	3,46	8,239	4,03	8,892	4,60	9,500	9,25	13,471
2,90	7,543	3,47	8,251	4,04	8,903	4,61	9,510	9,50	13,652
2,91	7,556	3,48	8,263	4,05	8,914	4,62	9,520	9,75	13,830
2,92	7,569	3,49	8,274	4,06	8,925	4,63	9,530	10,00	14,006
2,93	7,582	3,50	8,286	4,07	8,936	4,64	9,541	11,00	14,690
2,94	7,594	3,51	8,298	4,08	8,946	4,65	9,551	12,00	15,343
2,95	7,607	3,52	8,310	4,09	8,957	4,66	9,561	13,00	15,970
2,96	7,620	3,53	8,322	4,10	8,968	4,67	9,572	14,00	16,572
2,97	7,633	3,54	8,333	4,11	8,979	4,68	9,582	15,00	17,154
2,98	7,646	3,55	8,345	4,12	8,990	4,69	9,592	16,00	17,717
2,99	7,659	3,56	8,357	4,13	9,001	4,70	9,602	17,00	18,257
3,00	7,672	3,57	8,369	4,14	9,012	4,71	9,612	18,00	18,791
3,01	7,684	3,58	8,380	4,15	9,023	4,72	9,623	19,00	19,306
3,02	7,697	3,59	8,392	4,16	9,034	4,73	9,633	20,00	19,808
3,03	7,710	3,60	8,404	4,17	9,045	4,74	9,643	21,00	20,297
3,04	7,722	3,61	8,415	4,18	9,055	4,75	9,653	22,00	20,775
3,05	7,735	3,62	8,427	4,19	9,066	4,76	9,663	23,00	21,242
3,06	7,748	3,63	8,439	4,20	9,077	4,77	9,673	24,00	21,698
3,07	7,760	3,64	8,450	4,21	9,088	4,78	9,684	25,00	22,146
3,08	7,773	3,65	8,462	4,22	9,099	4,79	9,694	26,00	22,584
3,09	7,786	3,66	8,474	4,23	9,109	4,80	9,704	27,00	23,015
3,10	7,798	3,67	8,485	4,24	9,120	4,81	9,714	28,00	23,437
3,11	7,811	3,68	8,497	4,25	9,131	4,82	9,724	29,00	23,852
3,12	7,823	3,69	8,508	4,26	9,142	4,83	9,734	30,00	24,260
3,13	7,836	3,70	8,520	4,27	9,152	4,84	9,744	31,00	24,661

HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.	HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.	HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.	HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.	HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.
m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.
32	25,055	54	32,548	76	38,613	98	43,847	200	62,638
33	25,444	55	32,848	77	38,860	99	44,070	205	63,416
34	25,826	56	33,145	78	39,117	100	44,292	210	64.185
35	26,203	57	33,440	79	39,367	105	45,386	215	64,944
36	26.575	58	33,732	80	39,616	110	46,454	220	65,695
37	26,942	59	34,021	81	39,863	115	47,498	225	66,438
38	27,303	60	34,308	82	40,108	120	48,519	230	67,171
39	27,660	61	34,593	83	40,352	125	49,520	235	67,898
40	28,013	62	34,875	84	40,594	130	50,500	240	68,616
41	28,361	63	35,155	85	40,835	135	51,462	245	69,328
42	28,704	64	35,433	86	41,074	140	52,407	250	70,031
43	29,044	65	35,709	87	41,313	145	53,334	255	70,728
44	29,380	66	35,983	88	41,549	150	54,246	260	71,418
45	29,712	67	36,254	89	41,785	155	55,143	265	72,102
46	30,040	68	36,524	90	42,019	160	56,025	270	72,780
47	30,365	69	36,791	91	42,252	165	56,894	275	73,450
48	30,686	70	37,057	92	42,483	170	57,749	280	74,114
49	31,004	71	37,321	93	42,713	175	58,592	285	74,773
50	31,329	72	37,583	94	42,942	180	59,424	290	75,426
51	31,631	73	37,843	95	43,170	185	60,243	295	76,074
52	31,939	74	38,101	96	43,397	190	61,052	300	76,716
53	32,245	75	38,358	97	43,622	195	61,850		

135. **Écoulement à gueule-bée.** Lorsque l'écoulement a lieu à gueule-bée, c'est-à-dire quand les filets fluides se rapprochent des parois de l'orifice, ce qui a lieu quand l'épaisseur de la paroi est égale à au moins une fois et 1/2 sa plus petite dimension, ou que cet orifice est prolongé par un ajutage cylindrique ou prismatique d'une longueur égale à 3 ou 4 fois la plus petite dimension de l'orifice, on a, dans les cas ordinaires d'écoulement de l'eau :

$$v' = 0,82\,v = 0,82\,\sqrt{2gh}.$$

v' Vitesse réelle avec laquelle l'eau s'écoule (149) ;
$v = \sqrt{2gh}$ vitesse théorique d'écoulement (133 et 134).

Pour l'établissement des jets d'eau à l'aide de courts ajutages légèrement convergents (150), on peut supposer $v' = 0,87\ v$.

136. *Lorsque l'écoulement a lieu par un orifice noyé sur les deux faces,*

on a : $$v = \sqrt{2g(h - h')}.$$

v vitesse théorique d'écoulement ;
h hauteur du niveau de l'eau dans le vase alimentaire, au-dessus du centre de gravité de l'orifice (*Int.* 1586 et suiv.) ;
h' hauteur du niveau de l'eau dans le vase alimenté, au-dessus du centre de gravité de l'orifice ;
$(h - h')$ différence de niveau de l'eau dans les deux vases, ou hauteur génératrice de la vitesse v.

137. *Si le liquide qui s'écoule était soumis à une pression constante,* à celle d'un piston par exemple, on aurait :

$$v = \sqrt{2g(h + h')}.$$

v vitesse théorique ;
h hauteur du niveau du liquide au-dessus du centre de gravité de l'orifice ;
h' pression exercée par le piston, évaluée en hauteur du liquide.

138. Dépense théorique par un orifice d'écoulement. En négligeant la diminution de la vitesse et la contraction de la veine à la sortie de l'orifice, ce qui suppose le parallélisme des tranches (132), la dépense, que nous appellerons *dépense théorique*, est :

$$Q = sv.$$

Q dépense théorique ou volume d'eau théoriquement écoulé par seconde ;
s section de l'orifice ; pour un orifice rectangulaire dont l est la largeur et h la hauteur, on a $s = l \times h$; pour un orifice circulaire dont r est le rayon, $s = \pi r^2$;
$v = \sqrt{2gh}$ vitesse théorique d'écoulement (133, 134).

139. Dépense effective. La quantité d'eau qui s'écoule réellement par un orifice se nomme *dépense effective;* elle est toujours moindre que la dépense théorique, on a :

$$Q = ksv = ks\sqrt{2gh}.$$

Q dépense effective (170) ;
sv dépense théorique (138) ;
k coefficient, dit *coefficient de contraction*, ou *coefficient de la dépense ;* c'est le rapport de la dépense effective à la dépense théorique ; sa valeur dépend surtout de la charge de l'orifice d'écoulement, de la forme de cet orifice et de sa position par rapport aux parois du vase.

140. Contraction complète de la veine. Pour que la contraction soit complète, c'est-à-dire pour qu'elle s'opère sur tout le contour de l'orifice, il faut que cet orifice soit éloigné du fond et des parois du vase d'au moins une fois et 1/2 à 2 fois sa plus petite dimension. C'est pour ce cas et pour les orifices rectangulaires verticaux en mince paroi que Poncelet et Lesbros ont déterminé les valeurs du coefficient de la dépense, consignées dans le tableau suivant :

1° *Les charges étant la hauteur du niveau, en un point du réservoir où l'eau est parfaitement stagnante, au-dessus de l'arête supérieure de l'orifice.*

CHARGES sur le sommet de l'orifice.	Valeur du coefficient k pour les hauteurs d'orifice de					
	0m,20	0m,10	0m,05	0m,03	0m,02	0m,01
m.						
0,000	»	»	»	»	»	»
0,005	»	»	»	»	»	0,705
0,010	»	»	0,607	0,630	0,660	0,701
0,015	»	0,593	0,612	0,632	0,660	0,697
0,020	0,572	0,596	0,615	0,634	0,659	0,694
0,030	0,578	0,600	0,620	0,638	0,659	0,688
0,040	0,582	0,603	0,623	0,640	0,658	0,683
0,050	0,585	0,605	0,625	0,640	0,658	0,679
0,060	0,587	0,607	0,627	0,640	0,657	0,676
0,070	0,588	0,609	0,628	0,639	0,656	0,673
0,080	0,589	0,610	0,629	0,638	0,656	0,670
0,090	0,591	0,610	0,629	0,637	0,655	0,668
0,100	0,592	0,611	0,630	0,637	0,654	0,666
0,120	0,593	0,612	0,630	0,636	0,653	0,663
0,140	0,595	0,613	0,630	0,635	0,651	0,660
0,160	0,596	0,614	0,631	0,634	0,650	0,658
0,180	0,597	0,615	0,630	0,634	0,649	0,657
0,200	0,598	0,615	0,630	0,633	0,648	0,655
0.250	0,599	0,616	0,630	0,632	0,646	0,653
0,300	0,600	0,616	0,629	0,632	0,644	0,650
0,400	0,602	0,617	0,628	0,631	0,642	0,647
0,500	0,603	0,617	0,628	0,630	0,640	0,644
0,600	0,604	0,617	0,627	0,630	0,638	0,642
0,700	0,604	0,616	0,627	0,629	0,637	0,640
0,800	0,605	0,616	0,627	0,629	0,636	0,637
0,900	0,605	0,615	0,626	0,628	0,634	0,635
1,000	0,605	0,615	0,626	0,628	0,633	0,632
1,100	0,604	0,614	0,625	0,627	0,631	0,629
1,200	0,604	0,614	0,624	0,626	0,628	0,626
1,300	0,603	0,613	0,622	0,624	0,625	0,622
1,400	0,603	0,612	0,621	0,622	0,622	0,618
1,500	0,602	0,611	0,620	0,620	0,619	0,615
1,600	0,602	0,611	0,618	0,618	0,617	0,613
1,700	0,602	0,610	0,617	0,616	0,615	0.612
1.800	0,601	0,609	0,615	0,615	0,614	0,612
1,900	0,601	0,608	0,614	0,613	0,612	0,611
2,000	0,601	0,607	0,613	0,612	0,612	0,611
3,000	0,601	0,603	0,606	0,608	0,610	0,609

2° *Les charges étant la hauteur du niveau de l'eau, immédiatement au-dessus de l'orifice, au-dessus de l'arête supérieure de cet orifice.*

0,000	0,619	0,667	0,713	0,766	0,783	0,795
0,005	0,597	0,630	0,668	0,725	0,750	0,778
0,010	0,595	0,618	0,642	0,687	0,720	0,762
0,015	0,594	0,615	0,639	0,674	0,707	0,745
0,020	0,594	0,614	0,638	0,668	0,697	0,729
0,030	0,593	0,613	0,637	0,659	0,685	0,708
0,040	0,593	0,612	0,636	0,654	0,678	0,695
0,050	0,593	0,612	0,636	0,651	0,672	0,686
0,060	0,594	0,613	0,635	0,647	0,668	0,681

CHARGES sur le sommet de l'orifice.	Valeur du coefficient k pour des hauteurs d'orifice de					
	0m,20	0m,10	0m,05	0m,03	0m,02	0m,01
m.						
0,070	0,594	0,613	0,635	0,645	0,665	0,677
0,080	0,594	0,613	0,635	0,643	0,662	0,675
0,090	0,595	0,614	0,634	0,641	0,659	0,672
0,100	0,595	0,614	0,634	0,640	0,657	0,669
0,120	0,596	0,614	0,633	0,637	0,655	0,665
0,140	0,597	0,614	0,632	0,636	0,653	0,661
0,160	0,597	0,615	0,631	0,635	0,651	0,659
0,180	0,598	0,615	0,631	0,634	0,650	0,657
0,200	0,599	0,615	0,630	0,633	0,649	0,656
0,250	0,600	0,616	0,630	0,632	0,646	0,653
0,300	0,601	0,616	0,629	0,632	0,644	0,651
0,400	0,602	0,617	0,629	0,631	0,642	0,647
0,500	0,603	0,617	0,628	0,630	0,640	0,645
0,600	0,604	0,617	0,627	0,630	0,638	0,643
0,700	0,604	0,616	0,627	0,629	0,637	0,640
0,800	0,605	0,616	0,627	0,629	0,636	0,637
0,900	0,605	0,615	0,626	0,628	0,634	0,635
1,000	0,605	0,615	0,626	0,628	0,633	0,632
1,100	0,604	0,614	0,625	0,627	0,631	0,629
1,200	0,604	0,614	0,624	0,626	0,628	0,626
1,300	0,603	0,613	0,622	0,624	0,625	0,622
1,400	0,603	0,612	0,621	0,622	0,622	0,618
1,500	0,602	0,611	0,620	0,620	0,619	0,615
1,600	0,602	0,611	0,618	0,618	0,617	0,613
1,700	0,602	0,610	0,617	0,616	0,615	0,612
1,800	0,601	0,609	0,615	0,615	0,614	0,612
1,900	0,601	0,608	0,614	0,613	0,613	0,611
2,000	0,601	0,607	0,614	0,612	0,612	0,611
3,000	0,601	0,603	0,606	0,610	0,610	0,609

Lorsque la hauteur de l'orifice dépasse 0m,20, on peut prendre pour coefficients de la dépense ceux de la hauteur 0m,20.

Les coefficients du tableau précédent s'appliquent à un orifice de forme quelconque, sans angle rentrant, pourvu que la plus petite dimension de l'orifice soit la hauteur du tableau, et ils s'appliquent aux orifices noyés comme à ceux qui débouchent à l'air libre; seulement, dans ce dernier cas, la hauteur génératrice est la différence des niveaux de l'eau au-dessus des deux faces de l'origine (136); ainsi l'on a :

$$Q = ks\sqrt{2g(h-h')}.$$

Application. Quel est le volume d'eau qui s'écoule en une seconde par un orifice rectangulaire de 0m,20 de largeur et 0m,10 de hauteur, la charge au-dessus de l'arête supérieure de l'orifice, mesurée en un point où l'eau est stagnante, étant 0m,95, et la contraction de la veine étant complète?

Faisant $k = 0{,}615$, $s = 0{,}20 \times 0{,}10$ et $h = 0{,}95 + 0{,}05 = 1{,}00$ dans la formule du n° 139, on a :

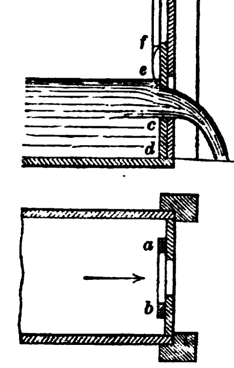
$$Q = 0{,}615 \times 0{,}20 \times 0{,}10\sqrt{2 \times 9{,}8088 \times 1} = 0^{mc}{,}0545.$$

141. Influence de la largeur de l'orifice. D'après les expériences de Lesbros, le coefficient de la dépense dépend du plus petit des inter-

valles qui séparent les bords opposés de l'orifice (140); mais il est indépendant, toutes choses égales d'ailleurs, de l'autre dimension de l'orifice. Ainsi pour trois orifices rectangulaires en mince paroi, de 0^{m},02 de hauteur et de 0^{m},60, 0^{m},20 et 0^{m},02 de largeur, la charge en un point où l'eau est stagnante sur le sommet de l'orifice ayant varié de 0^{m},01 à 3 mètres, le coefficient de la dépense a varié respectivement de 0,644 à 0,615 pour le premier orifice et de 0,660 à 0,608 pour chacun des deux derniers.

142. Orifice percé dans une paroi en bois de 0^{m},05 d'épaisseur : le seuil ayant 0^{m},10 de largeur à cause de la pièce de bois *cd* sur laquelle vient reposer le bas de la vanne *ef* quand elle ferme l'orifice; la vanne glissant entre deux joues verticales *a* et *b* de 0^{m},05 d'épaisseur placées à une certaine distance des bords de l'orifice et le seuil et les bords verticaux de l'orifice étant complètement isolés du fond et des parois du réservoir, ce qui rend la contraction complète. Les arêtes de l'orifice sont vives du côté d'amont et du côté d'aval, sans aucun biseau.

Fig. 23.



Cette disposition, qui se rapproche beaucoup de celle des pertuis ordinaires d'usines, et qu'il sera facile de réaliser pour les jaugeages relatifs aux moteurs hydrauliques, a été expérimentée par le colonel du génie Lesbros; le tableau suivant contient les valeurs du coefficient k de la dépense pour un orifice de 0^{m},60 de largeur, débouchant à l'air libre, la charge sur le sommet de l'orifice étant prise en un point où l'eau est parfaitement stagnante (157).

CHARGES sur le sommet de l'orifice.	VALEURS DU COEFFICIENT k pour des hauteurs d'orifice de				CHARGES sur le sommet de l'orifice.	VALEURS DU COEFFICIENT k pour des hauteurs d'orifice de			
	0^{m},40	0^{m},20	0^{m},05	0^{m},03		0^{m},40	0^{m},20	0^{m},05	0^{m},03
mèt.					mèt.				
0,010	»	»	0,627	0,657	0,500	0,653	0,678	0,696	0,711
0,015	»	»	0,630	0,661	0,600	0,650	0,677	0,696	0,710
0,020	»	»	0,634	0,664	0,700	0,646	0,677	0,696	0,709
0,030	»	0,636	0,640	0,670	0,800	0,643	0,676	0,695	0,708
0,040	»	0,641	0,646	0,675	0,900	0,639	0,676	0,695	0,707
0,050	0,624	0,645	0,651	0,680	1,000	0,636	0,676	0,695	0,706
0,060	0,627	0,648	0,656	0,684	1,100	0,633	0,676	0,695	0,704
0,070	0,629	0,652	0,661	0,687	1,200	0,630	0,675	0,695	0,703
0,080	0,631	0,654	0,665	0,690	1,300	0,628	0,675	0,695	0,702
0,090	0,633	0,656	0,669	0,693	1,400	0,626	0,675	0,694	0,701
0,100	0,635	0,658	0,672	0,695	1,500	0,624	0,675	0,694	0,700
0,120	0,639	0,662	0,679	0,699	1,600	0,622	0,675	0,694	0,699
0,140	0,642	0,664	0,684	0,702	1,700	0,621	0,675	0,694	0,699
0,160	0,644	0,667	0,687	0,704	1,800	0,620	0,674	0,694	0.698
0,180	0,646	0,669	0,689	0,706	1,900	0,618	0,674	0,694	0,697
0,200	0,648	0,671	0,691	0,707	2,000	0,617	0,674	0,694	0,697
0,300	0,654	0,677	0,695	0,710	3,000	0,607	0,673	0,692	0,693
0,400	0,654	0,679	0,696	0,711					

143. Contraction incomplète. Lorsqu'une partie du contour de l'orifice fait prolongement aux parois du vase, la contraction est supprimée sur cette partie, et, par suite, elle est incomplète. Dans ce cas, d'après les expériences de Bidone, on a, selon que l'orifice est rectangulaire ou circulaire :

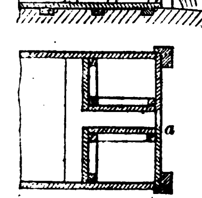
$$k' = k\left(1 + 0{,}1523\,\frac{n}{p}\right) \quad \text{ou} \quad k' = k\left(1 + 0{,}1279\,\frac{n}{p}\right).$$

k' coefficient de la dépense dans le cas de la contraction incomplète ;
k coefficient de la dépense dans le cas de la contraction complète ; sa valeur est celle indiquée au tableau du n° 140 ;
n portion du contour de l'orifice sur laquelle la contraction est supprimée ;
p périmètre total de l'orifice.

144. Expériences de Lesbros sur des orifices où la contraction est incomplète et que l'on rencontre habituellement dans la pratique.

1° Lesbros, en opérant sur un orifice de 0m,20 de largeur sur 0m,20 de hauteur, le fond et les parois latérales étant dans le prolongement du fond et des parois du réservoir, mais le bord supérieur étant taillé en biseau du côté d'aval pour réaliser la mince paroi du côté d'amont, a obtenu, en faisant varier de 0m,19 à 1m,70 la charge sur le sommet de l'orifice, mesurée où l'eau est stagnante, pour k', c'est-à-dire pour le coefficient k de la formule $Q = ks\sqrt{2gh}$, des valeurs qui ont varié de 0,715 à 0,670 et qui ont été en moyenne de 0,680. Les côtés verticaux de l'orifice étant, comme il est indiqué en a de la figure 24, en saillie de 0m,02 sur les parois du réservoir et taillés en biseau comme le dessus, disposition qui peut se rencontrer par suite de la forme des feuillures dans lesquelles glisse la vanne, la charge ayant varié de 0m,16 à 1m,70, k a varié de 0,679 à 0,660 et a été 0,668 en moyenne; valeurs sensiblement les mêmes que dans le cas précédent.

Fig. 24.



2° La contraction n'étant supprimée que sur les côtés verticaux de l'orifice, qui sont dans le prolongement des parois du réservoir, mais le seuil étant éloigné du fond du réservoir et taillé en biseau comme le bord supérieur, Lesbros a obtenu pour un orifice de 0m,20 de largeur les valeurs de k du tableau suivant, qui suppose les charges mesurées où l'eau est parfaitement stagnante.

CHARGES sur le sommet de l'orifice.	VALEURS DE *k* pour des hauteurs d'orifice de		
	0m,20	0m,05	0m,01
m.			
0,01	»	0,659	0,730
0,05	0,648	0,649	0,695
0,10	0,645	0,645	0,683
0,20	0,641	0,642	0,675
1,00	0,638	0,634	0,658
1,50	0,637	0,627	0,651
2,00	0,636	0,621	0,647
3,00	0,634	0,614	0,644

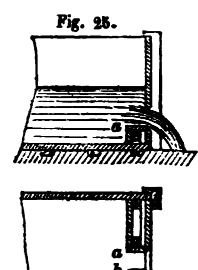


Fig. 25.

3° *Orifices ordinaires*. Lesbros a encore étudié le cas où le seuil et les côtés verticaux étant complètement isolés des parois du réservoir, ils n'ont que 0m,267 d'épaisseur; d'où il résulte que la contraction n'est réellement complète que sur le bord supérieur de l'orifice, qui est taillé en biseau. Cette disposition se rencontre très fréquemment dans les vannes de décharge et d'usines; les orifices sont limités à deux montants verticaux de 0m,25 à 0m,30 d'équarrissage, dont les pieds reposent sur une pièce horizontale en saillie sur le fond du canal et formant le seuil de l'orifice.

Tableau des valeurs de k, *obtenues par Lesbros, pour un orifice de* 0m,20 *de largeur, les charges étant mesurées où l'eau est stagnante.*

(*a*) Quand les bords de l'orifice sont à vive arête du côté d'amont comme en *a*;
(*b*) Quand ces arêtes sont légèrement arrondies pour diminuer la contraction, comme en *b*.

CHARGES sur le sommet de l'orifice.	(*a*) ARÊTES VIVES. Valeurs de *k* pour des haut. d'orifice de			(*b*) ARÊTES ARRONDIES. Valeurs de *k* pour des haut. d'orifice de		
	0m,20	0m,05	0m,01	0m,20	0m,05	0m,01
m.						
0,05	»	0,719	0,711	»	0,717	0,729
0,06	»	0,716	0,708	»	0,715	0,726
0,08	»	0,712	0,704	»	0,711	0,721
0,10	»	0,709	0,701	»	0,709	0,717
0,12	»	0,706	0,699	»	0,706	0,714
0,14	»	0,703	0,697	»	0,704	0,711
0,16	0,760	0,700	0,695	0,738	0,703	0,709
0,18	0,732	0,698	0,693	0,722	0,701	0,706
0,20	0,713	0,696	0,692	0,713	0,700	0,704
0,30	0,688	0,689	0,687	0,705	0,697	0,697
0,40	0,684	0,685	0,683	0,703	0,695	0,694
0,50	0,682	0,682	0,681	0,702	0,695	0,693
1,00	0,680	0,679	0,680	0,700	0,692	0,695
1,50	0,679	0,677	0,677	0,699	0,688	0,692
2,00	0,678	0,675	0,673	0,698	0,684	0,688
3,00	0,676	0,672	0,670	0,696	0,680	0,684

Remarque. Du côté d'aval, les orifices soumis à l'expérience (1°, 2° et 3°) se terminaient sur tout leur pourtour par un biseau de même largeur que celui du bord supérieur.

145. Vanne d'écluse. Pour une vanne d'écluse, dont le seuil est en général très rapproché du fond du radier d'amont, le coefficient de la dépense est 0,625, que la vanne soit ou non noyée sur les deux faces.

Application. Quelle est la dépense par seconde d'une vanne de $1^m,20$ de largeur et de $0^m,20$ de levée, la charge sur le centre de l'orifice étant de $2^m,50$?

Le tableau du n° 134 donnant $7^m,003$ pour vitesse d'écoulement, la la dépense est :

$$0,625 \times 1,20 + 0,20 \times 7,003 = 1^{mc},050.$$

146. Orifices voisins. Pour deux vannes très rapprochées, comme celles des portes busquées d'une écluse à sas, on prenait pour coefficient de la dépense 0,55; mais des expériences faites par M. Castel ont démontré que le voisinage de deux ou de trois orifices ne change pas le coefficient de la dépense; il conviendra donc, comme dans le cas précédent, de le faire égal à 0,625.

M. l'ingénieur en chef Baumgarten a fait des expériences sur le vannage des prises d'eau alimentant le canal qui a servi aux *Recherches expérimentales sur l'écoulement de l'eau dans les canaux découverts*, par Darcy, inspecteur général, et Bazin, ingénieur des ponts et chaussées (1865).

Le vannage avait $5^m,40$ de largeur, et il était muni de quatre vannes en tôle de chacune 1 mètre de largeur pouvant se lever de $0^m,40$. Les orifices étaient garnis de tôle, afin que l'écoulement se fît en mince paroi. La charge sur le seuil était de $0^m,55$ à $0^m,70$, et le seuil était à $0^m,80$ au-dessus du radier de la chambre dans laquelle se déversaient les eaux.

Une seule vanne étant levée de :

$0^m,10$ $0^m,20$ $0^m,30$ $0^m,40$,

le coefficient de la dépense a été respectivement :

0,645 0,639 0,631 0,621.

Quand on ouvrait les 4 vannes à la fois, le coefficient devenait 0,637.

La chambre dans laquelle ce premier vannage versait l'eau, prise dans le canal de Bourgogne, avait 14 mètres de longueur dans le sens normal au canal et $5^m,40$ de largeur. Un second vannage, dit de *jaugeage*, pratiqué vers l'extrémité d'un des grands côtés de cette chambre, versait l'eau dans la rigole d'expérience établie parallèlement au canal. Un homme chargé de la manœuvre des vannes de prise d'eau maintenait constamment le niveau dans la chambre à $0^m,80$ au-dessus du centre des orifices du vannage de jaugeage, ce qui permettait d'obtenir un débit constant, malgré les variations de niveau dans le canal de Bourgogne.

Le vannage de jaugeage était composé de 12 petites vannes en cuivre glissant entre des coulisseaux également en cuivre. Le seuil de ces vannes était à 0m,40 au-dessus du fond de la chambre. Chacune d'elles présentait, lorsqu'elle était complètement ouverte, une section carrée de 0m,20 de côté. L'écoulement s'opérait en mince paroi.

Ces 12 orifices étant à peu près semblables à l'orifice-type expérimenté par Poncelet et Lesbros (140), le coefficient de la dépense aurait dû être 0,604, et servir à déterminer le débit. Mais comme la contraction n'était pas complète, et qu'en outre l'impulsion du courant venant des vannes de prise d'eau augmentait notablement le débit, celui-ci a dû être déterminé par des expériences de tarage spéciales. Pour pouvoir appliquer le coefficient 0,604, le seuil des orifices eût dû être à 0m,60 au moins au-dessus du fond, l'écartement 0m,113 des orifices beaucoup plus grand, et la chambre probablement d'une étendue considérable pour un débit de 1200 litres par seconde, afin que l'eau pût être sensiblement réduite au repos avant de s'engager dans le second barrage.

Après de nombreuses expériences sur ce barrage de jaugeage, le nombre des vannes ouvertes étant :

1 2 3 4 5 et au-dessus,

le coefficient de la dépense définitivement adopté par Darcy et Bazin est respectivement :

0,633 0,642 0,646 0,649 0,650.

Les expériences faites sur ces deux barrages montrent que le coefficient de la dépense, sans être tout à fait indépendant du nombre des vannes ouvertes, n'augmente avec ce nombre que d'une quantité qu'on peut en général négliger dans la pratique.

147. Vannes inclinées. Pour des vannes inclinées, comme celles des roues à la Poncelet, dont la face inférieure et les deux faces latérales sont dans le prolongement des parois du réservoir, on a $k = 0{,}74$ pour une inclinaison de 1 de base sur 2 de hauteur, et $k = 0{,}80$ pour une inclinaison de 1 de base sur 1 de hauteur. La section s de la vanne (138) se prend égale au produit de la largeur par la hauteur de l'ouverture mesurée perpendiculairement au fond du pertuis et non suivant l'inclinaison de la vanne. (Pour la charge à prendre dans le cas des roues à la Poncelet, consulter ce genre de roues.)

148. *Lorsqu'un orifice est prolongé à l'intérieur du vase par un tuyau assez court pour que l'écoulement n'ait pas lieu à gueule-bée* (135), ce que l'on reconnaît à simple vue, le coefficient k de la dépense s'abaisse, d'après les expériences de Borda et celles de Bidone, à 0,515, et même à 0,50.

On voit que cette disposition, que l'on rencontre quelquefois dans les appareils hydrauliques et dans les jets d'eau, est très désavantageuse à la dépense.

149. Orifices circulaires garnis d'ajutages cylindriques de même

diamètre. Dans ce cas, il résulte des expériences faites par Eytelwein avec une série de tubes de $0^m,026$ de diamètre, que le coefficient de la dépense (139) varie avec le rapport de la longueur de l'ajutage à son diamètre, et qu'il est respectivement pour les rapports :

1 et au-dessous,	2 à 3,	12,	24,	36,	43,	60 :
0,62,	0,82,	0,77,	0,73,	0,68,	0,63,	0,60.

En faisant abstraction du frottement de l'eau dans l'ajutage, ce qui ne peut guère être permis que quand sa longueur ne dépasse pas trois fois au plus le diamètre ou la plus petite dimension de l'orifice (135), on a, d'après Navier, pour les ajutages prismatiques :

$$U = \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{1}{k}-1\right)^2}}\sqrt{2gh}, \quad \text{et} \quad Q = sU.$$

U vitesse de l'eau dans le tuyau, au point où la veine cesse d'être contractée, c'est-à-dire à une distance de l'orifice égale à 1 fois ou 1 fois 1/2 son diamètre (135) ;
h charge sur le centre de gravité de l'orifice ;
k coefficient de la dépense applicable à l'orifice quand il est en mince paroi et que la contraction est complète ;
Q dépense par l'ajutage ;
s section de l'orifice ou de l'ajutage.

Des orifices en mince paroi ayant donné $k = 0,61$, après leur avoir adapté un ajutage, on a obtenu $U = 0,82\sqrt{2gh}$, au lieu de $U = 0,84\sqrt{2gh}$ que donne la formule précédente.

150. Orifices circulaires garnis d'ajutages coniques convergents, c'est-à-dire d'ajutages dont le diamètre va en diminuant à partir de la paroi du vase. Dans ce cas, on prend pour section de l'orifice celle de l'extrémité de l'ajutage, et pour charge génératrice la charge sur le centre de cette extrémité. M. Castel, en opérant sur des ajutages dont la longueur était égale à 2,6 fois le diamètre à l'extrémité, a trouvé pour coefficient de la dépense (139) et pour coefficient de la vitesse (133 et 135) les résultats du tableau suivant, qui varient, comme on le voit, avec l'angle de convergence que font entre elles les génératrices de l'ajutage.

ANGLES de convergence.	COEFFICIENTS de la		ANGLES de convergence.	COEFFICIENTS de la	
	dépense.	vitesse.		dépense.	vitesse.
0° 0′	0,829	0,830	13° 24′	0,946	0,962
1 36	0,866	0,866	14 28	0,941	0,966
3 10	0,895	0,894	16 36	0,938	0,971
4 10	0,912	0,910	19 28	0,924	0,970
5 26	0,924	0,920	21 0	0,918	0,971
7 52	0,929	0,931	23 0	0,913	0,974
8 58	0,934	0,942	29 58	0,896	0,975
10 20	0,938	0,950	40 20	0,869	0,980
12 4	0,942	0,955	48 50	0,847	0,984

Les résultats de ce tableau ont été obtenus avec une série d'ajutages dont le diamètre à l'extrémité était 0m,0155. Une autre série dont le diamètre était 0m,020 a donné des résultats de si peu supérieurs à ces premiers, qu'on peut supposer que la différence provient d'une légère erreur dans l'évaluation des diamètres.

Ces expériences, qui ont été faites sous des charges qui ont varié de 0m,215 à 3m,030, prouvent que les coefficients de la dépense et de la vitesse sont indépendants de la charge.

151. Ajutages coniques divergents. Le tableau suivant donne les résultats obtenus par Venturi, en opérant sous une charge constante de 0m,88. Les tubes portaient à leur extrémité adaptée au vase une embouchure convergente à peu près de la forme de la veine contractée. Cette embouchure avait 0m,0406 de diamètre près du vase, et 0m,0338 au point d'où ces génératrices commençaient à diverger.

LONGUEURS des ajutages.	ANGLES de divergence.	COEFFICIENTS de la dépense.	LONGUEURS des ajutages.	ANGLES de divergence.	COEFFICIENTS de la dépense.
mèt.			mèt.		
0,111	3°30′	0,93	0,059	5°44′	0,82
0,334	4 38	1,21	0,264	10 16	0,91
0,460	4 38	1,21	0,045	10 16	0,91
0,460	4 38	1,34	0,045	14 14	0,91
0,176	5 44	1,02			

Venturi conclut de ces expériences que la dépense est maximum quand la longueur de l'ajutage est égale à 9 fois le diamètre de la plus *petite* base, et que l'angle de divergence que font entre elles les génératrices est de 5°6′. Avec ces proportions, dit l'auteur, la dépense est égale à 2,4 fois la dépense du même orifice en mince paroi, ou à 1,46 fois la dépense théorique.

152. Orifices prolongés en dehors par un coursier horizontal de même largeur et découvert. Lesbros a expérimenté un orifice rectangulaire de 0m,20 de largeur, ainsi prolongée d'un coursier; le bord supérieur de l'orifice étant dans tous les cas taillé en biseau, comme au n° 144, il a obtenu pour le coefficient *k* les valeurs du tableau suivant:

CHARGES sur le sommet de l'orifice.	VALEUR DE k POUR LES DISPOSITIFS ET LES HAUTEURS D'ORIFICE : (a)					(b)			(c)			(d)				(e)		
	$0^m,20$	$0^m,10$	$0^m,05$	$0^m,03$	$0^m,01$	$0^m,20$	$0^m,05$	$0^m,01$	$0^m,20$	$0^m,05$	$0^m,01$	$0^m,20$	$0^m,05$	$0^m,03$	$0^m,01$	$0^m,20$	$0^m,05$	$0^m,01$
m.																		
0,010	»	0,458	0,447	0,424	0,566	»	0,435	0,571	»	0,526	0,653	»	0,432	0,486	0,569	»	0,472	0,584
0,015	0,471	0,472	0,468	0,467	0,583	»	0,463	0,596	0,482	0,542	0,661	»	0,458	0,516	0,590	»	0,493	0,607
0,020	0,480	0,484	0,488	0,501	0,599	0,480	0,487	0,616	0,489	0,555	0,667	»	0,483	0,539	0,607	»	0,512	0,625
0,030	0,493	0,507	0,525	0,551	0,626	0,493	0,526	0,642	0,500	0,575	0,676	0,493	0,522	0,573	0,634	»	0,543	0,651
0,040	0,503	0,527	0,555	0,598	0,645	0,502	0,552	0,660	0,509	0,589	0,682	0,502	0,550	0,595	0,651	0,518	0,566	0,667
0,050	0,511	0,544	0,577	0,629	0,658	0,510	0,571	0,670	0,517	0,600	0,684	0,509	0,570	0,609	0,662	0,528	0,582	0,679
0,060	0,518	0,557	0,594	0,632	0,667	0,517	0,583	0,676	0,523	0,608	0,684	0,515	0,584	0,617	0,670	0,530	0,595	0,686
0,070	0,525	0,568	0,606	0,632	0,671	0,523	0,592	0,680	0,530	0,614	0,683	0,520	0,593	0,621	0,676	0,543	0,604	0,692
0,080	0,531	0,576	0,614	0,633	0,672	0,528	0,598	0,682	0,535	0,619	0,682	0,525	0,601	0,624	0,680	0,549	0,611	0,692
0,090	0,537	0,582	0,620	0,633	0,672	0,533	0,602	0,683	0,541	0,622	0,680	0,530	0,606	0,626	0,682	0,555	0,616	0,696
0,100	0,542	0,586	0,624	0,633	0,671	0,538	0,605	0,682	0,545	0,625	0,679	0,534	0,609	0,627	0,685	0,560	0,621	0,697
0,200	0,574	0,606	0,631	0,632	0,664	0,566	0,617	0,679	0,576	0,633	0,666	0,562	0,623	0,635	0,688	0,589	0,637	0,698
0,300	0,591	0,612	0,629	0,631	0,658	0,580	0,622	0,676	0,590	0,632	0,659	0,577	0,627	0,637	0,684	0,603	0,643	0,696
0,400	0,597	0,615	0,626	0,630	0,652	0,587	0,625	0,673	0,597	0,631	0,654	0,586	0,629	0,638	0,681	0,613	0,646	0,694
0,500	0,599	0,615	0,625	0,629	0,648	0,592	0,626	0,671	0,602	0,630	0,651	0,591	0,630	0,638	0,678	0,619	0,647	0,691
1,000	0,601	0,615	0,624	0,625	0,631	0,600	0,628	0,665	0,609	0,627	0,634	0,601	0,633	0,638	0,671	0,630	0,649	0,685
2,000	0,601	0,607	0,613	0,613	0,613	0,602	0,623	0,654	0,610	0,616	0,620	0,604	0,631	0,636	0,659	0,632	0,644	0,674
3,000	0,601	0,603	0,606	0,607	0,609	0,601	0,618	0,652	0,609	0,609	0,615	0,602	0,628	0,634	0,656	0,630	0,639	0,670

(*a*) Contraction complète, c'est-à-dire le seuil et les côtés verticaux de l'orifice étant éloignés du fond et les parois latérales du réservoir.

(*b*) Contraction supprimée sur le seuil de l'orifice, qui coïncide avec le fond du réservoir.

(*c*) Contraction supprimée sur un des côtés verticaux.

(*d*) Contraction supprimée sur le seuil et un des côtés verticaux.

(*e*) Contraction supprimée sur le seuil et les côtés verticaux (1°, n° 140).

Les charges sont dans tous les cas mesurées où l'eau est stagnante.

On pourra calculer la vitesse moyenne de l'eau dans le coursier, à une distance de l'orifice égale à 1,5 ou 2 fois la plus petite dimension de cet orifice, à l'aide de la formule donnée par Navier pour le cas des orifices garnis d'ajutages prismatiques (149).

Pour un coursier incliné, en négligeant le frottement de l'eau contre la paroi, on a :

$$u = \sqrt{2g(H + H')}.$$

u vitesse moyenne à l'extrémité du coursier ;

$H = \frac{U^2}{2g}$ hauteur due à la vitesse à l'origine du coursier (149) ;

H' pente totale du coursier.

153. Orifices garnis d'ajutages directeurs (*fig.* 26). Dans les roues à augets qui prennent l'eau en dessous du sommet, il arrive souvent que l'orifice de la vanne est garni d'un certain nombre d'ajutages qui dirigent l'eau dans les augets. Dans ce cas, on considère séparément chaque ajutage découvert, et l'on prend, dans le calcul de la dépense (139), pour largeur de la vanne, celle de l'ajutage ; pour levée de la vanne, la plus petite distance a, ou a' ou a''... des diaphragmes qui forment l'ajutage considéré; pour hauteur génératrice, la hauteur h, ou h', ou h''... du niveau de l'eau au-dessus du centre de gravité de la plus petite distance a, ou a', ou a''...; enfin, pour coefficient de la dépense, 0,75. La somme des dépenses des différents orifices est la dépense totale.

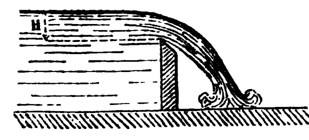
Fig. 26.



154. Lorsqu'une vanne est accompagnée d'une buse pyramidale appelée *bec-de-cane*, comme cela a encore lieu pour distribuer l'eau sur la roue dans quelques anciennes usines, dans le calcul de la dépense (139), on prend pour ouverture de la vanne la section de l'extrémité du bec-de-cane; pour charge génératrice, la charge sur le centre de l'extrémité du bec, et pour coefficient de la dépense, 0,98; cette valeur est tirée des résultats de trois expériences de M. Lespinasse, sur une buse de 2^{m},923 de longueur, ayant 0^{m},731 sur 0^{m},975 à sa grande base, et 0^{m},135 sur 0^{m},190 à la petite. D'après des expériences de MM. Piobert et Tardy, il convient de faire ce coefficient égal à 0,864 quand les buses sont garnies intérieurement de cadres en bois ou en fer faisant saillie.

155. Orifices en déversoir. Pour les orifices en déversoir, la dépense effective est donnée par la formule :

Fig. 27.



$$Q = kLH\sqrt{2gH}.$$

Q volume d'eau écoulé par seconde ;
k coefficient de la dépense;
L largeur du déversoir;
H hauteur du niveau de l'eau au-dessus du seuil du déversoir; cette hauteur se mesure en un point où le dénivellement ne se fait plus sentir, c'est-à-dire à 3 ou 4 mètres en amont du déversoir (163).

Tableau des valeurs du coefficient k *obtenues par Lesbros en opérant sur un orifice de* 0m,20 *de largeur versant à l'air libre; le déversoir étant vertical et les bords de l'orifice étant taillés en biseau à* 45°, *comme aux nos* 144 *et* 152, *ce qui réalise une mince paroi.*

(*a*) Contraction complète ; la hauteur du seuil au-dessus du fond du réservoir est de 0m,54, et la distance D des côtés verticaux aux parois du réservoir est de 1m,74.

(*a'*), (*a''*), (*a'''*). Le seuil, comme pour (*a*), mais la distance D est respectivement 0m,54, 0m,02 et 0m,00 ; ainsi pour (*a'''*) la contraction est entièrement supprimée sur les côtés verticaux, et pour (*a''*) la saillie 0m,02 a la disposition qu'indique en *a* la figure 23.

(*b*) Contraction supprimée sur le seuil, mais complète sur les côtés verticaux comme pour (*a*).

(*c*) Contraction supprimée sur le seuil, complète sur un côté vertical, et D = 0m,02 pour l'autre côté vertical, ce qui supprime à peu près la contraction sur ce dernier côté, comme le fait voir la comparaison des valeurs de *k* des dispositifs (*a''*) et (*a'''*).

(*d*) Contraction supprimée sur le fond, et D = 0m,02 pour les deux côtés verticaux.

VALEURS de H.	VALEURS DE *k* POUR LES DISPOSITIFS :						
	(*a*)	(*a'*)	(*a''*)	(*a'''*)	(*b*)	(*c*)	(*d*)
m.							
0,01	0,424	0,436	0,457	0,492	0,384	0,362	0,292
0,02	0,417	0,428	0,444	0,473	0,402	0,379	0,318
0,03	0,412	0,422	0,435	0,459	0,410	0,388	0,337
0,04	0,407	0,416	0,429	0,449	0,411	0,394	0,352
0,05	0,404	0,411	0,426	0,442	0,411	0,398	0,362
0,06	0,401	0,407	0,424	0,437	0,410	0,400	0,370
0,07	0,398	0,405	0,422	0,435	0,409	0,402	0,375
0,08	0,397	0,402	0,421	0,434	0,409	0,403	0,379
0,09	0,396	0,400	0,421	0,434	0,409	0,404	0,380
0,10	0,395	0,399	0,420	0,434	0,408	0,405	0,382
0,11	0,394	0,397	0,420	0,434	0,408	0,406	0,382
0,12	0,394	0,396	0,420	0,434	0,408	0,406	0,383
0,13	0,394	0,396	0,421	0,434	0,408	0,407	0,383
0,14	0,393	0,395	0,422	0,434	0,408	0,407	0,383
0,16	0,393	0,394	0,424	0,433	0,407	0,407	0,384
0,18	0,392	0,393	0,424	0,432	0,406	0,408	0,383
0,20	0,390	0,391	0,424	0,432	0,405	0,408	0,383
0,22	0,386	0,389	0,424	0,430	0,405	0,408	0,382
0,25	0,379	0,383	0,422	0,428	0,404	0,407	0,381
0,30	0,371	0,375	0,418	0,424	0,403	0,406	0,378

156. Influence du rapport de la largeur du déversoir à celle du canal. Des expériences exécutées par M. Castel, sur deux canaux de 0m,74 et 0m,36 de largeur, le seuil du déversoir étant à 0m,17 au-dessus du fond du canal, il résulte, comme le confirme la colonne (*a'*) du tableau précédent, que dans la pratique on peut faire $k = 0,40$ quand la largeur du déversoir varie depuis 1/5 de celle du canal jusqu'à la valeur absolue 0m,05. Pour le jaugeage des petits cours d'eau ou des sources, on pourra établir des petits barrages à arêtes vives et employer cette valeur de *k*.

Lorsque la largeur au déversoir est égale à celle du canal (158), comme pour les vannes des roues hydrauliques, les barrages de riviè-

res, etc., le barrage étant vertical, mince et à arêtes vives, on a sans erreur sensible $k = 0,443$ (valeur que semble confirmer la colonne (a''') du tableau précédent). Toutefois, dit d'Aubuisson, la hauteur H ne doit pas excéder le tiers de la hauteur du barrage au-dessus du fond du canal; car, au delà de cette limite, la vitesse d'arrivée de l'eau augmente le débit.

Voici du reste, pour des charges H comprises entre 0m,03 et 0m,22, les valeurs moyennes de k admises par d'Aubuisson, pour différents rapports r entre la largeur du déversoir et celle du canal :

Rapports r. .	1,00	0,90	0,80	0,70	0,60	0,50	0,40	0,30	0,25
Valeurs de k.	0,443	0,438	0,431	0,423	0,416	0,410	0,405	0,399	0,398

157. *Tableau des valeurs de* k *obtenues par Lesbros pour un déversoir de* 0m,60 *de largeur ouvert dans des parois de* 0m,05 *sur le seuil et les côtés, sans biseau; le seuil étant à* 0m,54 *au-dessus du fond du déversoir, et les côtés verticaux se trouvant à* 1m,54 *des parois de ce déversoir. Les valeurs de* k *limitées à* H = 0m,10 *et* H = 0m,45 *ont été obtenues par l'expérience; en deçà et au delà de ces limites, les valeurs de* k *ont été déduites de la représentation graphique des premières* (142).

H est toujours mesurée en un point où l'eau est parfaitement stagnante.

VALEURS de H.	VALEURS de k.	VALEURS de H.	VALEURS de k.	VALEURS de H.	VALEURS de k.	VALEURS de H.	VALEURS de k.
m.		m.		m.		m.	
0,01	0,424	0,07	0,410	0,16	0,399	0,40	0,391
0,02	0,421	0,08	0,409	0,18	0,397	0,50	0,391
0,03	0,418	0,09	0,407	0,20	0,395	0,60	0,390
0,04	0,416	0,10	0,406	0,25	0,392	0,80	0,390
0,05	0,414	0,12	0,403	0,30	0,391	0,90	0,389
0,06	0,412	0,14	0,401	0,35	0,391	1,00	0,389

158. Déversoir de même largeur que le canal d'arrivée et de direction normale à ce canal (156). **M. le capitaine d'artillerie Boileau a** exécuté à Metz, de 1845 à 1853 (*Traité de la mesure des eaux courantes*, 1854) des expériences sur ces déversoirs. Les barrages, formés de madriers, étant à parois verticales, et le seuil étant incliné à 45°, de manière à se terminer par une arête vive du côté d'amont, ce qui constitue un *barrage-type* (*fig.* 27), les débits sont représentés par la formule du n° 155, dans laquelle, pour les *nappes libres*, c'est-à-dire détachées complètement du barrage du côté d'aval et tombant librement dans l'air, k prend les valeurs du tableau suivant :

VALEURS de H.	VALEURS DE *k* POUR DES HAUTEURS DE BARRAGES au-dessus du fond du canal d'arrivée de									
	0m,20	0m,30	0m,40	0m,50	0m,60	0m,70	0m,80	0m,90	1m,00	1m,10
m.										
0,04	0,421	0,426	0,418	0,408	0,402	0,404	0,413	0,425	0,418	0,408
0,05	0,419	0,423	0,419	0,409	0,399	0,398	0,409	0,423	0,416	0,406
0,06	0,416	0,422	0,414	0,404	0,398	0,400	0,410	0,422	0,416	0,406
0,07	0,418	0,422	0,415	0,404	0,398	0,400	0,410	0,422	0,416	0,406
0,08	0,418	0,424	0,415	0,405	0,399	0,401	0,411	0,422	0,416	0,406
0,09	»	0,424	0,422	0,416	0,408	0,407	0,413	0,419	0,416	0,409
0,10	»	0,425	0,424	0,418	0,410	0,409	0,413	0,419	0,416	0,411
0,12	»	0,428	0,427	0,421	0,411	0,409	0,412	0,420	0,419	0,413
0,14	»	»	0,432	0,424	0,413	0,408	0,410	0,422	0,424	0,414
0,16	»	»	0,436	0,430	0,418	0,408	0,410	0,426	0,425	0,415
0,18	»	»	»	0,432	0,424	0,416	0,417	0,428	0,424	0,416
0,20	»	»	»	0,436	0,431	0,427	0,428	0,430	0,426	0,418
0,22	»	»	»	»	0,435	0,432	0,433	0,432	0,428	0,419
0,24	»	»	»	»	0,435	0,434	0,437	0,434	0,429	0,423
0,26	»	»	»	»	0,435	0,437	0,439	0,437	0,431	0,425
0,28	»	»	»	»	0,437	0,439	0,441	0,440	0,434	0,427
0,30	»	»	»	»	»	0,441	0,444	0,444	0,437	0,427
0,32	»	»	»	»	»	»	0,445	0,445	0,442	0,427
0,34	»	»	»	»	»	»	0,443	0,445	0,441	0,427
0,36	»	»	»	»	»	»	0,440	0,443	0,437	0,426
0,38	»	»	»	»	»	»	0,441	0,441	0,433	0,424
0,40	»	»	»	»	»	»	0,443	0,440	0,432	0,423
0,42	»	»	»	»	»	»	0,445	0,440	0,433	»
0,44	»	»	»	»	»	»	0,447	0,442	0,434	»
0,46	»	»	»	»	»	»	0,449	0,444	0,436	»
0,48	»	»	»	»	»	»	0,451	»	»	»
0,50	»	»	»	»	»	»	0,454	»	»	»

Si dans le barrage-type précédent la nappe, au lieu de tomber librement dans l'air sous forme de veine parabolique, comme le suppose le tableau ci-dessus, est *noyée en dessous*, c'est-à-dire si, par l'effet du niveau de l'eau dans le canal de fuite, le remous qui se forme à l'aval du barrage, entre ce barrage et la nappe liquide, s'élève jusqu'au sommet du barrage, le coefficient *k* prend les valeurs du tableau suivant:

VALEURS de H.	VALEURS DE k POUR LES HAUTEURS DE BARRAGES au-dessus du fond du canal d'arrivée de								
	$0^m,20$	$0^m,25$	$0^m,30$	$0^m,35$	$0^m,40$	$0^m,45$	$0^m,50$	$0^m,55$	$0^m,60$
m.									
0,09	0,485	»	»	»	»	»	»	»	»
0,10	0,483	»	»	»	»	»	»	»	»
0,11	0,481	»	»	»	»	»	»	»	»
0,12	0,479	»	»	»	»	»	»	»	»
0,13	0,476	»	»	»	»	»	»	»	»
0,14	0,473	»	»	»	»	»	»	»	»
0,15	0,468	0,472	0,477	0,483	»	»	»	»	»
0,16	0,463	0,466	0,472	0,479	»	»	»	»	»
0,17	0,458	0,462	0,467	0,475	0,486	»	»	»	»
0,18	0,453	0,458	0,463	0,470	0,481	»	»	»	»
0,19	0,451	0,455	0,459	0,467	0,478	»	»	»	»
0,20	0,448	0,452	0,456	0,464	0,476	»	»	»	»
0,22	0,445	0,448	0,452	0,460	0,472	0,489	»	»	»
0,24	0,441	0,444	0,449	0,457	0,470	0,486	»	»	»
0,26	0,437	0,440	0,446	0,454	0,467	0,483	»	»	»
0,28	0,432	0,437	0,444	0,452	0,466	0,480	»	»	»
0,30	0,427	0,435	0,444	0,452	0,462	0,469	0,475	0,480	0,486
0,32	0,421	0,430	0,438	0,446	0,454	0,461	0,468	0,474	0,480
0,34	0,418	0,424	0,431	0,438	0,445	0,453	0,460	0,467	0,474
0,36	0,417	0,424	0,431	0,438	0,444	0,450	0,457	0,463	0,469
0,38	0,417	0,424	0,431	0,438	0,444	0,450	0,455	0,460	0,464
0,40	0,417	0,424	0,431	0,438	0,444	0,449	0,453	0,457	0,461
0,42	»	»	»	»	0,444	0,448	0,452	0,455	0,456
0,44	»	»	»	»	0,443	0,447	0,450	0,453	0,456
0,46	»	»	»	»	0,441	0,445	0,448	0,451	0,454
0,48	»	»	»	»	0,439	0,442	0,446	0,448	0,450
0,50	»	»	»	»	0,437	0,439	0,442	0,444	0,445

En comparant les résultats des deux tableaux précédents, on voit que, contrairement à ce qu'on aurait pu supposer, sous une charge égale H', un même barrage débite un volume d'eau beaucoup plus grand quand il est noyé en dessous que quand la nappe coule librement.

D'après les observations de M. Boileau, la hauteur du barrage au-dessus du canal de fuite étant :

$0^m,200$ $0^m,250$ $0^m,300$ $0^m,350$ $0^m,400$ $0^m,450$ $0^m,500$ $0^m,600$,

la charge H à laquelle la nappe commence à être noyée est respectivement :

$0^m,070$ $0^m,095$ $0^m,115$ $0^m,135$ $0^m,155$ $0^m,180$ $0^m,200$ $0^m,280$

159. Barrage incliné vers l'amont à 1 de base pour 3 de hauteur (*fig.* 28), disposition fréquente dans la pratique.

Fig. 28.

1° M. Boileau, en inclinant ainsi un *barrage-type* (158) de $0^m,458$ de hauteur au-dessus du fond du canal d'arrivée, a obtenu, pour différentes charges H, une valeur moyenne de k égale à 0,4136. Cette moyenne ayant été de 0,4153 pour le même barrage vertical d'égale hauteur, on voit que l'inclinaison ne modifie pas sensiblement la dépense Q.

2° Un barrage incliné comme ci-dessus, épais de $0^m,10$ à $0^m,12$ et à

seuil arrondi en demi-cylindre circulaire, a donné à M. Boileau les valeurs de k du tableau suivant, qui montrent que si l'inclinaison du barrage est sans effet sur le débit, il n'en est pas de même de la forme du seuil, puisque celle demi-circulaire, en diminuant la contraction verticale, augmente considérablement la dépense Q.

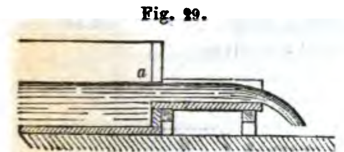
NAPPES ADHÉRENTES à la face d'aval du barrage.		NAPPES NOYÉES en dessous.	
Valeurs de H.	Valeurs de k.	Valeurs de H.	Valeurs de k.
m.		m.	
0,08	0,464	0,18	0,578
0,09	0,483	0,19	0,574
0,10	0,498	0,20	0,570
0,11	0,510	0,21	0,567
0,12	0,519	0,22	0,565
0,13	0,528	0,23	0,563
0,14	0,532	0,24	0,562
0,15	0,549	0,25	0,561
0,16	0,562	0,26	0,561

160. Déversoirs formés par les vannes alimentaires des roues de côté. Ces vannes sont à peu près inclinées à 1 de base pour 3 de hauteur. Le tableau suivant donne les valeurs du coefficient k, que M. Boileau a déduites de plusieurs séries d'expériences dans lesquelles il a examiné les cas les plus ordinaires de la pratique.

VALEURS de H.	Vanne de 0m,04 à 0m,05 d'épaisseur, arrondie supérieurement en quart de cercle tangent à la face d'aval et normal à la face d'amont.		Vanne terminée supérieurement par un boudin circulaire de 0m,07 à 0m,10 de diamètre, tangent à la face d'aval et saillant sur la face d'amont, avec laquelle il se raccorde par un congé arrondi.	
	Nappes libres.	Nappes adhérentes.	Nappes libres.	Nappes adhérentes.
m.				
0,05	0,393	0,434	»	»
0,06	[illegible]	0,448	»	»
0,07	0,396	0,465	»	»
0,08	0,408	0,465	»	»
0,09	0,422	0,481	»	0,447
0,10	0,428	0,498	0,403	0,457
0,11	0,433	0,511	0,417	0,467
0,12	0,437	0,512	0,432	0,476
0,13	0,441	0,530	0,446	0,585
0,14	0,445	0,535	0,458	0,494
0,15	0,450	»	0,468	0,502
0,16	0,453	»	0,477	0,510
0,17	0,457	»	0,486	0,517
0,18	»	»	0,494	0,524
0,19	»	»	0,502	0,530
0,20	»	»	0,508	0,535
0,21	»	»	»	0,539
0,22	»	»	»	0,542

Les valeurs de k de ce tableau montrent que l'adhérence de la nappe à la face d'aval de la vanne augmente considérablement la dépense. Aussi, à cause de la difficulté de s'assurer si la nappe est libre ou non, sera-t-il prudent, s'il s'agit d'un jaugeage rigoureux, d'établir un barrage spécial.

Fig. 29.



161. Orifices en déversoir prolongés en dehors *par un coursier horizontal ou légèrement incliné de même largeur, à l'extrémité duquel l'eau tombe librement.*

Tableau des valeurs de k *obtenues par Lesbros pour un orifice rectangulaire de* 0^{m},20 *de largeur.*

(*a*) Contraction complète sur le seuil et les côtés verticaux de l'orifice.
(*b*) Contraction supprimée sur le seuil, qui est dans le plan du fond du réservoir.
(*c*) Contraction supprimée sur le seuil et un des côtés verticaux.
(*d*) Contraction supprimée sur le seuil et les côtés verticaux.
(*e*) Contraction complète sur le seuil, mais supprimée sur un côté vertical.
(*f*) Contraction complète sur le seuil, et supprimée sur les deux côtés verticaux.
(*g*) Contraction complète sur le seuil, et supprimée sur les deux côtés verticaux.

Remarque 1re. Le coursier du dispositif (*g*) avait 2^{m},50 de longueur et il était incliné au 1/10. Tous les autres coursiers étaient horizontaux et avaient 3 mètres de longueur.

Remarque 2e. Dans les dispositifs (*c*), (*d*), (*e*), (*f*), (*g*), la contraction n'était pas supprimée complètement sur les côtés verticaux, en *a* les bords de l'orifice faisant une saillie de 0^{m},02 taillée en biseau à 45° sur les parois du canal et du coursier. L'influence de cette saillie ne pouvant être que faible d'après ce qui a été constaté au 1° du n° 144 pour les orifices avec charge sur le sommet, et d'après les valeurs très peu différentes de k pour les dispositifs (a'') et (a''') du n° 155 dès que la charge H atteint 0^{m},05, on pourra la négliger dans les cas ordinaires de la pratique.

VALEURS de H.	VALEURS DE k POUR LES DISPOSITIFS :						
	(*a*)	(*b*)	(*c*)	(*d*)	(*e*)	(*f*)	(*g*)
m.							
0,01	»	»	»	»	0,382	0,395	0,406
0,02	0,196	0,208	0,201	0,175	0,368	0,383	0,395
0,03	0,234	0,232	0,228	0,205	0,358	0,373	0,385
0,04	0,263	0,251	0,250	0,234	0,351	0,365	0,379
0,05	0,278	0,266	0,267	0,260	0,346	0,360	0,375
0,06	0,286	0,281	0,280	0,276	0,344	0,355	0,372
0,07	0,292	0,288	0,289	0,285	0,343	0,352	0,371
0,08	0,297	0,294	0,295	0,291	0,341	0,349	0,371
0,09	0,301	0,298	0,300	0,395	0,340	0,347	0,370
0,10	0,304	0,302	0,304	0,299	0,340	0,345	0,369
0,11	0,306	0,305	0,307	0,303	0,339	0,344	0,369
0,12	0,309	0,308	0,310	0,306	0,338	0,343	0,369
0,13	0,311	0,310	0,312	0,308	0,337	0,342	0,368
0,14	0,313	0,312	0,314	0,311	0,336	0,341	0,368
0,16	0,316	0,316	0,317	0,315	0,334	0,340	0,367
0,18	0,317	0,319	0,319	0,319	0,333	0,339	0,367
0,20	0,319	0,323	0,322	0,322	0,331	0,338	0,366
0,22	0,320	0,325	0,324	0,325	0,330	0,337	0,365
0,25	0,321	0,329	0,326	0,329	0,328	0,336	0,364
0,30	0,324	0,332	0,329	0,332	0,326	0,334	0,361

162. *Pour les déversoirs formés par le barrage-type de M. Boileau*, et ayant la même largeur que le canal d'arrivée (158), M. le capitaine d'artillerie Clarinval (*Annales des mines*, 1858), de la discussion des résultats obtenus par MM. Castel, Lesbros et Boileau, a conclu la formule suivante, qui donne, avec une grande approximation, les dépenses Q pour les charges ordinaires H de la pratique, et quelle que soit la hauteur du barrage au-dessus du fond du canal d'arrivée :

$$Q = LH\sqrt{2gH}\,\frac{h\sqrt{1-\frac{h}{H}}}{\sqrt{2(H^2-h^2)}} = LHh\sqrt{\frac{g}{H+h}}.$$

h épaisseur de la lame d'eau, mesurée sur l'arête intérieure même du déversoir.

La première expression de la valeur de Q n'est autre chose que celle de la formule ordinaire $Q = kLH\sqrt{2gH}$ dans laquelle le coefficient k est remplacé par sa valeur $\frac{h\sqrt{1-\frac{h}{H}}}{\sqrt{2(H^2-h^2)}}$, que M. Clarinval déduit de quelques considérations théoriques.

M. Clarinval a reconnu que sa formule est également applicable au barrage-type incliné à 1 de base pour 3 de hauteur (1°, n° 159).

163. La valeur de H se détermine au moyen d'une règle mise de niveau, ou mieux, comme l'indique M. Boileau, en plaçant verticalement un tube en verre, droit et de 5 à 6 millimètres de diamètre intérieur, de manière que son extrémité inférieure s'applique contre la face d'amont du barrage. L'eau s'élève dans le tube au niveau H, plus une petite quantité due à l'effet de la capillarité, et dont il convient de tenir compte. d étant le diamètre intérieur du tube en millimètres, cet excès, exprimé en millimètres, est $\frac{29,8}{d}$.

Une deuxième correction qu'il convient de faire, surtout quand la largeur L est faible, porte sur la diminution que le tube mis en place pendant l'expérience fait subir à cette largeur. M. Boileau a reconnu que cette correction est constante pour un même tube, et qu'elle est de $0^m,021$ ou $0^m,013$, selon que le diamètre extérieur du tube est de $0^m,015$ ou $0^m,010$.

Pour mesurer h, à une traverse solide allant d'une rive à l'autre, au-dessus de la crête du barrage et hors de l'eau, on fixe une première règle dans une position bien verticale. Contre cette règle, on en fait glisser une seconde, jusqu'à ce que son extrémité, armée d'une pointe, repose sur l'arête du barrage sans y pénétrer; on la ramène complètement hors de l'eau, puis on la fait redescendre jusqu'à ce que la pointe affleure la lame fluide. Les deux positions prises par la règle mobile contre la règle fixe indiquent la valeur de h.

164. *Tableau des valeurs du rapport* $\frac{H}{h} = r$ *obtenues par M. Boileau pour différentes valeurs de* H *et diverses hauteurs de barrages au-dessus du fond du canal d'arrivée, les barrages, qui sont du modèle-type* (158), *ayant la même largeur que le canal et les nappes étant libres.*

VALEURS de H.	RAPPORTS r POUR DES HAUTEURS DE BARRAGES DE				BARRAGE DE 0m,918 DE HAUT.	
	0m,262	0m,325	0m,420	0m,518	H.	Rapports r.
m.					m.	m.
0,03	1,339	»	»	1,285	0,063	1,200
0,04	1,282	»	1,320	1,250	0,073	1,195
0,05	1,260	»	1,285	1,228	0,081	1,191
0,06	1,234	1,243	1,249	1,214	0,085	1,189
0,07	1,223	1,232	1,231	1,205	0,121	1,186
0,08	1,216	1,232	1,223	1,200	0,133	1,184
0,09	1,212	1,228	1,218	1,199	0,163	1,181
0,10	1,210	1,225	1,217	1,199	0,178	1,179
0,12	1,206	1,221	1,212	1,197	0,189	1,177
0,14	1,202	1,216	1,206	»	0,218	1,175
0,16	1,199	»	1,201	»	0,230	1,173
0,18	1,196	»	1,195	»	0,247	1,173
0,20	1,192	»	1,191	»	0,261	1,175
0,25	1,186	»	»	»	0,331	1,177
0,30	1,184	»	»	»	0,357	1,180
0,35	1,182	»	»	»	0,370	1,182
					0,436	1,185

Les valeurs de H divisées par les valeurs de r donneront celles correspondantes de h. Si, au contraire, h a été déterminée, si $h = 0^m,13$ par exemple, pour un barrage de $0^m,262$ de hauteur, d'après l'inspection du tableau, il y a lieu d'attribuer à r une valeur voisine de 1,202. Adoptant d'abord cette valeur, on aura $H = 0,13 \times 1,202 = 0^m,15626$. Cette valeur de H correspondant sensiblement à ;

$$r = 1,202 - (1,202 - 1,199)\frac{0,15626 - 0,14}{0,16 - 0,14} = 1,199561,$$

on pourra définitivement prendre $H = 0,13 \times 1,199561 = 0^m,15594293$, soit $0^m,1559$. On voit que cette correction de H est peu importante et qu'on pourra généralement la négliger dans la pratique; ce qui dispensera de faire l'interpolation précédente.

Le tableau précédent montre que, pour des déversoirs de même largeur que le canal, H s'écarte peu de $1,20\,h$ quand H varie de $0^m,08$ à $0^m,35$. On admettait pour ces déversoirs $H = 1,25h$, et $H = 1,178\,h$ quand la largeur du déversoir était les 4/5 de celle du réservoir.

Nous donnons ci-après des résultats d'expériences pour le cas où les nappes sont noyées en dessous.

Tableau des valeurs du rapport r *quand les nappes sont noyées en dessous* (158).

VALEURS de H.	RAPPORTS r POUR DES HAUTEURS DE BARRAGES DE		
	$0^m,325$	$0^m,335$	$0^m,420$
m.			
0,13	»	1,283	»
0,14	»	1,275	1,291
0,15	1,256	1,266	1,284
0,16	1,250	1,258	1,271
0,18	1,236	1,245	1,254
0,20	1,225	1,232	1,241
0,22	1,216	1,223	»
0,24	1,208	1,216	»
0,26	1,202	1,208	»
0,28	1,198	1,203	»
0,30	»	1,198	»

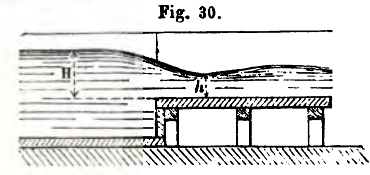
165. *Les barrages de rivières* construits en maçonnerie étant d'une grande épaisseur et à surface supérieure inclinée à 1/10 environ, on pourra leur appliquer les valeurs de k du dispositif (g) du n° 161.

166. Barrages obliques. D'après les expériences de M. Boileau, on calculera le débit d'un même barrage d'égale longueur qui serait normal au canal, et l'on multipliera le résultat par 0,942 ou 0,911, selon que l'obliquité sera de 45° ou de 65°.

167. Barrages en chevrons. Des expériences de M. Boileau il résulte que le débit est celui d'un même barrage droit également incliné par rapport au canal d'arrivée, et dont la longueur est égale à la somme de celle des ailes du chevron, augmentée de la moitié de la projection de la corde de l'arrondissement du saillant sur un plan perpendiculaire à l'axe du canal.

168. Déversoirs incomplets. Dans les canaux qui conduisent l'eau sur les roues hydrauliques et dans les canaux d'irrigation, il peut arriver que l'eau ait en aval du déversoir un niveau supérieur au seuil de ce déversoir. On peut, dans ce cas, calculer approximativement la dépense, en considérant l'orifice comme composé de deux parties : l'une supérieure au niveau de l'eau dans le canal de fuite, et qui constitue un déversoir à lame noyée en dessous (158), dont la charge H est la différence des niveaux de l'eau dans le canal d'arrivée et dans le canal de fuite ; l'autre inférieure au niveau de l'eau dans le canal de fuite, et dont on calculera la dépense comme pour un orifice noyé sur les deux faces, en prenant encore pour charge la différence des niveaux en amont et en aval du déversoir (140).

Fig. 30.



Lesbros a examiné le cas assez ordinaire où le seuil et les côtés verticaux du déversoir sont isolés du fond et des parois du réservoir ; il a obtenu pour le débit :

$$Q = kLH\sqrt{2g(H-h)}.$$

h distance verticale du seuil du déversoir au-dessous du point le plus bas, c'est-à-dire de plus grande inflexion, de la surface de l'eau ; ce point est à une certaine distance en aval de l'orifice, où la surface de la lame descendante rencontre la surface de l'eau dans le canal de fuite.

Les autres lettres ont les mêmes significations qu'au n° 155, et k prend les valeurs du tableau suivant :

VALEURS de $\frac{H-h}{H}$	VALEURS de k.	VALEURS de $\frac{H-h}{H}$	VALEURS de k.	VALEURS de $\frac{H-h}{H}$	VALEURS de k.
0,003	0,363	0,020	0,570	0,100	0,516
0,004	0,430	0,025	0,557	0,150	0,512
0,005	0,496	0,030	0,546	0,200	0,507
0,006	0,556	0,035	0,537	0,250	0,502
0,007	0,597	0,040	0,531	0,300	0,497
0,008	0,605	0,045	0,526	0,350	0,492
0,009	0,600	0,050	0,522	0,400	0,487
0,010	0,596	0,060	0,519	0,450	0,480
0,015	0,580	0,080	0,517	0,500	0,474

169. Écoulement de l'eau lorsque le niveau est variable sur une ou sur les deux faces de l'orifice d'écoulement, et que le vase qui se vide, ainsi que celui qui se remplit, ont des sections horizontales constantes en tous les points de leur profondeur.

Ce qui va suivre s'applique principalement aux écluses des canaux de navigation.

Nous avons vu que la dépense en une seconde par un orifice est, lorsque le niveau reste constant (139) :

$$Q = ksv = ks\sqrt{2gh}.$$

Le temps nécessaire pour que la dépense soit égale à la capacité de la partie du bassin située au-dessus de l'orifice est alors, pour un bassin prismatique :

$$t = \frac{Ah}{Q} = \frac{Ah}{ks\sqrt{2gh}}. \qquad (a)$$

Q dépense par seconde ;
k coefficient de la dépense ;
s section de l'orifice d'écoulement ;
t durée de l'écoulement, en secondes ;
A section horizontale du bassin ;
h hauteur du niveau de l'eau au-dessus de l'orifice d'écoulement ;
Ah capacité de la partie du bassin située au-dessus de l'orifice d'écoulement, ou dépense pendant le temps t.

Lorsque le vase se vide sans qu'il reçoive le liquide, la durée t de la vidange de la partie supérieure à l'orifice est double de ce qu'elle est, pour la même dépense, lorsque le niveau de l'eau reste constant ; ainsi,

pour le cas de la formule (a), on a :

$$t' = 2t = \frac{2Ah}{ks\sqrt{2gh}} = \frac{2A}{ks\sqrt{2g}}\sqrt{h}. \qquad (b)$$

Le temps que met le niveau pour descendre d'une quantité $h - h'$ est

$$T = \frac{2A}{ks\sqrt{2g}}(\sqrt{h} - \sqrt{h'}). \qquad (c)$$

T durée de l'écoulement, en secondes ;
h charge sur l'orifice au commencement du temps T ;
h' charge sur l'orifice après le temps T.

Si l'on suppose $h' = 0$ dans la formule précédente, c'est-à-dire que le niveau baisse de toute la hauteur h, on obtient, comme cela devait avoir lieu, l'expression (b); ainsi l'on a :

$$T = \frac{2A}{ks\sqrt{2g}}\sqrt{h} = t'.$$

De la formule (c) on tire, pour le temps d'écoulement T, l'abaissement de niveau :

$$h - h' = \frac{T ks\sqrt{2g}}{A}\left(\sqrt{h} - \frac{T ks\sqrt{2g}}{4A}\right). \qquad (d)$$

La dépense Q′, pour le temps T, est donc :

$$Q' = (h - h')A = T ks\sqrt{2g}\left(\sqrt{h} - \frac{T ks\sqrt{2g}}{4A}\right). \qquad (e)$$

Lorsque l'orifice d'écoulement est noyé sur les deux faces, les niveaux restant constants, la dépense est la même que pour l'écoulement à l'air libre, sous une charge égale à la différence $h - h'$ des charges sur les deux faces de l'orifice; ainsi l'on a, en représentant par Q la dépense par seconde :

$$Q = ks\sqrt{2g(h - h')}. \qquad \text{(136 et suivants.)}$$

Supposant que le niveau reste constant dans le bassin supérieur, et que le bassin inférieur ne perde pas d'eau, le temps qu'il faudra pour que le niveau s'établisse dans les deux bassins sera égal au temps (b) nécessaire pour la vidange à l'air libre du bassin qui se remplit, placé dans les mêmes circonstances de charges; ainsi l'on aura :

$$t' = \frac{2A}{ks\sqrt{2g}}\sqrt{h}.$$

t' temps nécessaire à l'établissement du niveau ;
A section horizontale du bassin qui se remplit ;
h différence de niveau du liquide dans les deux bassins au commencement du temps t'.

Le temps nécessaire pour que le niveau s'élève d'une quantité $h - h'$ est aussi égal au temps (c) nécessaire pour un abaissement de niveau égal à cette élévation si le bassin se vidait dans les mêmes circonstances

de charges ; ainsi l'on a :

$$T = \frac{2A}{ks\sqrt{2g}}(\sqrt{h} - \sqrt{h'}).$$

T temps que met le niveau à s'élever de la quantité $h - h'$;
h différence de niveau du liquide dans les deux vases au commencement du temps T ;
h' différence de niveau du liquide dans les deux vases à la fin du temps T.

La valeur $h - h'$ est encore égale à celle fournie par la formule (d), et la dépense est aussi égale à celle donnée par la formule (e).

Si l'on suppose que l'orifice d'écoulement étant noyé sur les deux faces, le niveau soit variable dans les deux bassins, c'est-à-dire que l'un des bassins se vide pour remplir l'autre, comme cela a lieu pour deux sas contigus dans un canal de navigation, le temps nécessaire pour que le niveau s'établisse dans les deux bassins est :

$$T = \frac{2AB\sqrt{h-h'}}{ks\sqrt{2g}(A+B)}.$$

T durée de l'établissement du niveau ;
$h-h'$ différence de niveau du liquide dans les deux bassins quand on ouvre la vanne ;
A et B sections horizontales des deux bassins.

Cette formule fait voir que T est le même pour une égale valeur de $h-h'$, que A soit la section du bassin qui se vide, et B celle de celui qui se remplit, ou que B soit la section du premier et A celle du second.

Il peut encore arriver que l'orifice d'écoulement ne soit noyé sur les deux faces que pendant une partie du temps de remplissage. Alors, pour avoir ce temps, on le divise en deux parties : l'une correspondant au remplissage de la portion du bassin inférieure à l'orifice d'écoulement, et que l'on calcule facilement d'après ce qui vient d'être dit, soit que le bassin supérieur se vide ou qu'il conserve un niveau constant ; l'autre correspondant au remplissage de la portion de bassin supérieure à l'orifice d'écoulement, et que l'on calcule encore facilement, soit que le bassin supérieur se vide, soit qu'il conserve un niveau constant.

170. Darcy, pour jauger la source du Rosoir (*Fontaines publiques de la ville de Dijon*), s'est servi d'un barrage en planches, et, afin que l'orifice fût à mince paroi, tout le contour était garni, du côté d'amont, de feuilles de fer-blanc appliquées contre les planches, qu'elles dépassaient de 3 à 4 centimètres.

Darcy a opéré d'abord sur un orifice complètement noyé du côté d'amont, puis sur un orifice en déversoir, en élevant la planche supérieure jusqu'au-dessus du niveau de l'eau. Dans le premier cas, la dépense théorique a été calculée au moyen de la formule :

$$Q' = \frac{2}{3} l \sqrt{2g}(h_1\sqrt{h_1} - h\sqrt{h}),$$

et pour avoir la dépense effective Q, on a multiplié Q' par le coefficient

de contraction 0,62. Cette formule rigoureuse donne très sensiblement les mêmes résultats que celle du n° 139, qu'on ne peut considérer comme réellement exacte que pour les orifices très petits.

l largeur de l'orifice ; elle est sensiblement restée constante et égale à $0^m,535$;
h_1 charge sur l'arête inférieure de l'orifice ; elle a varié de $0^m,142$ à $0^m,375$;
h charge sur l'arête supérieure de l'orifice ; elle a été de $0^m,0825$ et $0^m,335$ pour les valeurs extrêmes précédentes de h_1.

Lorsque l'orifice était en déversoir, la dépense théorique était calculée par la formule

$$Q' = l\text{H}\sqrt{2g\text{H}} = 4{,}4292\, l\text{H}\sqrt{\text{H}},$$

et la dépense effective Q s'obtenait en multipliant Q' par le coefficient de contraction 0,40, trouvé par Poncelet et Lesbros, pour des orifices dont les parois sont tout à fait minces et non d'une épaisseur de $0^m,03$ (155). Ainsi l'on avait :

$$Q = 1{,}77\, l\text{H}\sqrt{\text{H}}.$$

l largeur du déversoir ;
H charge d'eau sur le seuil du déversoir, mesurée à quelque distance en amont de celui-ci.

COURS D'EAU

171. Cours d'eau à section constante et à pente uniforme, formules de de Prony et d'Eytelwein. Lorsque le régime des eaux est établi, c'est-à-dire quand le mouvement de l'eau est uniforme, on a :

$$Q = Sv, \quad \text{d'où l'on tire} \quad v = \frac{Q}{S}.$$

Q dépense ou volume d'eau écoulé par seconde ;
S section du cours d'eau ;
v vitesse moyenne d'écoulement de l'eau.

On a aussi, d'après de Prony :

$$I = \frac{P}{S}(av + bv^2).$$

I pente par mètre ; elle est égale à la différence de niveau de deux points de la surface de l'eau, divisée par la distance de ces deux points mesurée suivant l'axe du cours d'eau ;
S section transversale du cours d'eau ;
v vitesse moyenne du cours d'eau ;
P périmètre mouillé ; c'est le contour de la section S, diminué de la largeur du canal à la surface de l'eau ;
$a = 0{,}000\,044\,4499$, soit 0,000 0444, coefficient numérique constant ;
$b = 0{,}000\,309\,3140$, soit 0,000 309, *id.*

De Prony, qui a le premier donné la formule précédente, a déterminé les valeurs de a et b en discutant les résultats de trente et une expériences faites par Dubuat, sur des canaux factices et des rivières dont la section a varié de $8^{mq},011$ à $29^{mq},00$, et la vitesse moyenne de $0^m,12$ à $0^m,88$.

Eytelwein, en suivant la même marche que de Prony, mais en ajoutant aux résultats de Dubuat ceux obtenus depuis par Brünings, Woltmann et Funk, pour les canaux et des rivières dont la section fluide a varié de $0^{mq},014$ à $2604^{mq},00$, et la vitesse de $0^{m},124$ à $2^{m},42$, a conclu de quatre-vingt-onze résultats, que l'on devait faire dans la formule de de Prony $a = 0,000\,024\,2651$, soit $0,000\,024$, et $b = 0,000\,365\,5430$, soit $0,000\,365$.

La formule de de Prony, modifiée par les nouvelles valeurs de a et b d'Eytelwein, convient mieux au cas des grandes rivières; mais elle ne s'applique pas également bien aux quatre-vingt-onze expériences discutées par Eytelwein. Les résultats de Dubuat, notamment, sont beaucoup mieux représentés par la formule de de Prony.

172. Rayon moyen d'un cours d'eau. Formule de de Saint-Venant. On appelle *rayon moyen*, le quotient de la section transversale S d'un cours d'eau par le périmètre mouillé P; ainsi, en le représentant par R, on a :

$$R = \frac{S}{P};$$

et la formule de de Prony donne, en remplaçant a et b par leurs valeurs:

$$RI = 0,000\,0444v + 0,000\,309v^2;$$

d'où :

$$v = \sqrt{0,005\,163 + 3233,428RI} - 0,071\,85, \qquad (b)$$

ou à peu près :

$$v = 56,86\,\sqrt{RI} - 0,072. \qquad (b')$$

De ces formules on tirera la valeur de v, connaissant I et R, ou celle de la pente I pour obtenir une vitesse $v = \frac{Q}{S}$. (Le tableau du n° 185 donne les valeurs de RI.)

La valeur de R dépend de celle de la section S et de la forme de cette section, forme généralement déterminée par des exigences de localité. Si le canal est en bois ou en maçonnerie, on peut faire les parois verticales, et il convient que la largeur soit égale au double de la profondeur d'eau, afin de rendre le périmètre mouillé et par suite la résistance des parois la plus petite possible. Pour les canaux en terre, les parois sont en talus, et la largeur au fond varie de quatre à six fois la profondeur de l'eau; le rapport de la base du talus à sa hauteur se fait égal à 1/2 pour les perrés ordinaires, à 1 pour des terres fortes, et à 2 pour des terres ordinaires.

De Saint-Venant, de la discussion des résultats qui ont servi à de Prony et Eytelwein pour établir la formule précédente, et de quelques autres (*Annales des mines*, 4ᵉ série, t. XX), a conclu la formule monome :

$$RI = 0,000\,401\,02v^{\frac{21}{11}}, \quad \text{d'où} \quad v = 60,158\,(RI)^{\frac{11}{21}},$$

ou approximativement :

$$RI \doteq 0{,}0004 v^{\frac{21}{11}} \quad \text{et} \quad v = 60\,(RI)^{\frac{11}{21}}.$$

173. Expériences et formules de Darcy et Bazin (*Recherches expérimentales sur l'écoulement de l'eau dans les canaux découverts*, 1865). Les ingénieurs qui s'occupent du mouvement de l'eau dans les canaux et les tuyaux de conduite ont, depuis assez longtemps déjà, reconnu que les formules déduites par de Prony d'un nombre restreint d'expériences faites dans des circonstances peu comparables n'étaient applicables qu'à certains cas.

L'influence de la nature des parois, dont ces formules font abstraction, ayant été constatée par les recherches de Darcy sur le mouvement de l'eau dans les tuyaux de conduite, des études analogues furent entreprises pour déterminer les lois de la même influence sur le mouvement de l'eau dans les canaux. Ce fut en 1855 que Darcy entreprit ses nouvelles expériences sur une très grande échelle, avec le concours de MM. les ingénieurs Baumgarten et Ritter, jusqu'en 1856, puis jusqu'à sa mort, survenue en 1858, avec celui de Bazin, à qui il était réservé de les continuer pour les terminer en 1860, d'en réunir et discuter les résultats, et d'en déduire des conséquences importantes pour l'art de l'ingénieur.

La plupart des expériences ont eu lieu dans une rigole établie le long du canal de Bourgogne. Comme nous l'avons dit au n° 146, l'eau, prise dans le canal, était déversée par un vannage dans une chambre de $5^m,40$ de largeur sur 14 mètres de longueur, d'où elle se rendait par un second vannage dans la rigole d'expérience.

Cette rigole suivait parallèlement le canal sur une longueur de 450 mètres, puis se détournait à gauche pour aller verser ses eaux dans la rivière d'Ouche. Sa longueur totale était de $596^m,50$. Elle était construite en planches de peuplier clouées longitudinalement et maintenues par des cadres espacés de $1^m,50$ environ. Sa largeur était partout de 2 mètres et sa profondeur de $0^m,95$. Une chape imperméable l'enveloppait extérieurement, de manière à empêcher les pertes par infiltration dans le sol; cette chape était en terre argileuse pilonnée sous le fond et en mortier hydraulique contre les parois verticales.

La pente de la rigole n'était pas uniforme sur toute sa longueur; elle était de $0^m,0049$ environ par mètre sur 200 mètres à partir de l'origine; puis de $0^m,002$ par mètre jusqu'au delà de la partie courbe, c'est-à-dire sur 250 mètres de longueur; enfin, la dernière partie, de $146^m,50$ de longueur entre le canal et la rivière, avait une pente de $0^m,0084$ par mètre.

Telle était la construction primitive; elle n'a jamais été remaniée, et lorsqu'il a fallu expérimenter sur des pentes ou des sections différentes, on a toujours eu soin de n'endommager en rien le revêtement primitif. Les nouveaux profils, soit en long, soit en travers, s'établissaient dans la première rigole.

Les formules de de Prony, d'Eytelwein et de de Saint-Venant, qui ne

sont, à proprement parler, que des remaniements différents des mêmes données expérimentales, et qui font abstraction de la nature de la paroi, de la figure et de la grandeur du canal, ne peuvent s'appliquer à tous les cas d'écoulement de l'eau. C'est ce qu'a mis en évidence Bazin en traçant des courbes représentant les trois équations, ces courbes ayant les valeurs de $\frac{1}{v}$ pour abscisses et celles correspondantes de $\frac{RI}{v^2}$ pour ordonnées, et en marquant sur la même feuille les points correspondant aux résultats des expériences.

Bazin, en traçant de même des lignes ayant les valeurs de $\frac{1}{R}$ pour abscisses et celles de $\frac{RI}{v^2}$ pour ordonnées, a reconnu que les résultats étaient représentés, avec une approximation suffisante dans la pratique, par la formule de Darcy (qui est l'équation d'une droite) :

$$\frac{RI}{v^2} = \alpha + \frac{\beta}{R},$$

en donnant aux coefficients α et β des valeurs spéciales à chaque cas particulier.

Des expériences exécutées sur un même canal plus ou moins incliné prouvent que la pente n'a pas une influence notable sur les valeurs de α et β.

Des expériences faites sur des canaux à sections rectangulaires, trapézoïdales et triangulaires montrent que la figure du profil transversal ne paraît pas exercer une influence assez grande pour qu'il y ait lieu d'en tenir compte dans les applications. Cependant, si l'on passe des sections polygonales à une section demi-circulaire, on constate une différence assez notable; le débit d'un canal demi-circulaire a été trouvé supérieur d'environ 0,1 à celui d'un canal rectangulaire, toutes circonstances égales d'ailleurs. La forme ovoïde adoptée pour le profil des égouts a donc, outre l'avantage de ne présenter aucun angle rentrant, celui de fournir à égalité de pente et de rayon moyen le plus grand débit.

174. Influence de la nature des parois d'un canal sur son débit. Si l'influence de la pente longitudinale et de la figure du profil transversal peut être négligée dans la plupart des cas de la pratique qui n'exigent pas une approximation rigoureuse, il n'en est pas de même de celle de la nature de la paroi, et ici surgit une grande difficulté, puisqu'il s'agit d'un élément variable à l'infini, qui échappe par sa nature à toute appréciation théorique. Bazin est parvenu à vaincre cette difficulté en groupant les expériences en catégories peu nombreuses, correspondant, autant que possible, aux cas les plus ordinaires de la pratique. Ces catégories sont au nombre de quatre :

1[re]. Parois très unies (ciment lissé, bois raboté avec soin, etc.);
2[e]. Parois unies (pierre de taille, briques, planches, ciment mélangé de sable, etc.).

3ᵉ. Parois peu unies, en maçonnerie de moellons;
4ᵉ. Parois en terre.

Pour ces diverses catégories la formule précédente devient :

$$1^{\text{re}}.\ \text{Parois très unies} \ldots\ldots\ldots \frac{RI}{v^2} = 0{,}00015\left(1 + \frac{0{,}03}{R}\right);$$

$$2^{\text{e}}.\ \text{Parois unies} \ldots\ldots\ldots \frac{RI}{v^2} = 0{,}00019\left(1 + \frac{0{,}07}{R}\right);$$

$$3^{\text{e}}.\ \text{Parois peu unies} \ldots\ldots\ldots \frac{RI}{v^2} = 0{,}00024\left(1 + \frac{0{,}25}{R}\right);$$

$$4^{\text{e}}.\ \text{Parois en terre} \ldots\ldots\ldots \frac{RI}{v^2} = 0{,}00028\left(1 + \frac{1{,}25}{R}\right).$$

Traçant les lignes droites dont ces formules expriment les équations, en prenant les valeurs de $\frac{1}{R}$ pour abscisses et celles correspondantes de $\frac{RI}{v^2}$ pour ordonnées, et reportant sur les figures obtenues tous les résultats des expériences anciennes et nouvelles, Bazin montre que ces résultats de tous les observateurs sont, avec une exactitude suffisante pour la pratique, reproduites par les 4 formules précédentes.

Il y a même cela de remarquable que celle des 4 droites fournies par les 4 équations précédentes qui semble reproduire avec le plus d'exactitude les résultats des expériences faites sur des canaux d'une nature analogue, est celle que donne la 4ᵉ équation. On voit en effet se grouper des deux côtés de cette droite, dans une zone très étroite, les résultats des expériences faites sur les canaux ou rivières à parois en terre, dues à Dubuat, sur le canal du Jard et sur la rivière de Hayne; à Funk, sur le Weser; à M. Baumgarten, sur le canal de Marseille; à MM. Villevert et Poirée, sur la Seine, en 1851-1852; à MM. Bonnet et Emmery, sur la Seine, en 1852-1853; à M. Léveillé, sur la Saône, en 1858-1859, et enfin à Bazin, sur les rigoles de Chazilly et de Grosbois, du canal de Bourgogne.

Le tableau suivant contient les valeurs des seconds membres des formules précédentes. En représentant ces valeurs par A, on a :

$$\frac{RI}{v^2} = A, \quad \text{d'où} \quad v = \sqrt{\frac{RI}{A}}.$$

Ainsi, connaissant R et I pour un canal d'une nature de paroi connue, le tableau suivant donne A, puis de la formule précédente on conclut la vitesse moyenne v.

Les 4 formules-types précédentes ne sont pas applicables au cas d'un canal très petit dans lequel le rayon moyen descend au-dessous de $0^{m},03$, comme cela a lieu dans les petites rigoles d'irrigation, où la vitesse atteint rarement 1 mètre par seconde, et où la résistance des parois est considérable. L'expérience conduit alors à la relation très simple :

$$\frac{RI}{v} = \beta,$$

β étant une constante, qui augmente assez notablement avec la pente I; mais si l'on considère un canal dans lequel I est constant, on voit que la vitesse v varie simplement comme le rayon moyen.

Quatre canaux en bois de 0m,10 de largeur, dont les parois intérieures des deux derniers ont été couvertes de forte toile soigneusement clouée pour augmenter la résistance, ont donné respectivement pour β les valeurs moyennes suivantes sans grand écart :

	1er canal.	2e canal.	3e canal.	4e canal.
Pentes par mètre. . . .	0m,0047	0m,0152	0m,0081	0m,152.
Valeurs de β.	0,000193	0,000290	0,000421	0,000656.

175. *Tableau des valeurs de* $\frac{\mathrm{RI}}{v^2}$ *fournies par les quatre formules types précédentes, pour des valeurs du rayon moyen* R *comprises entre* 0m,01 *et* 6 *mètres.*

VALEURS de R.	VALEURS DE $\frac{\mathrm{RI}}{v^2}$.				VALEURS de R.	VALEURS DE $\frac{\mathrm{RI}}{v^2}$.			
	Parois très-unies.	Parois unies.	Parois peu unies.	Parois en terre.		Parois très-unies.	Parois unies.	Parois peu unies.	Parois en terre.
0,01	0,000600	»	»	»	0,38	0,000162	0,000225	0,000398	0,001201
0,02	0,000375	0,000855	»	»	0,39	0,000162	0,000224	0,000394	0,001177
0,03	0,000300	0,000633	»	»	0,40	0,000161	0,000223	0,000390	0,001155
0,04	0,000262	0,000522	»	»	0,41	0,000161	0,000222	0,000386	0,001134
0,05	0,000240	0,000456	0,001440	»	0,42	0,000161	0,000222	0,000383	0,001113
0,06	0,000225	0,000412	0,001240	»	0,43	0,000160	0,000221	0,000380	0,001094
0,07	0,000214	0,000380	0,001097	»	0,44	0,000160	0,000220	0,000376	0,001075
0,08	0,000206	0,000356	0,000990	»	0,45	0,000160	0,000220	0,000373	0,001058
0,09	0,000200	0,000338	0,000907	»	0,46	0,000160	0,000219	0,000370	0,001041
0,10	0,000195	0,000323	0,000840	0,003780	0,47	0,000160	0,000218	0,000368	0,001025
0,11	0,000191	0,000311	0,000785	0,003462	0,48	0,000159	0,000218	0,000365	0,001009
0,12	0,000188	0,000301	0,000740	0,003197	0,49	0,000159	0,000217	0,000362	0,000994
0,13	0,000185	0,000292	0,000702	0,002972	0,50	0,000159	0,000217	0,000360	0,000980
0,14	0,000182	0,000285	0,000669	0,002780	0,51	0,000159	0,000216	0,000358	0,000966
0,15	0,000180	0,000279	0,000640	0,002613	0,52	0,000159	0,000216	0,000355	0,000953
0,16	0,000178	0,000273	0,000615	0,002468	0,53	0,000158	0,000215	0,000353	0,000940
0,17	0,000176	0,000268	0,000593	0,002339	0,54	0,000158	0,000215	0,000351	0,000928
0,18	0,000175	0,000264	0,000573	0,002224	0,55	0,000158	0,000214	0,000349	0,000916
0,19	0,000174	0,000260	0,000556	0,002122	0,56	0,000158	0,000214	0,000347	0,000905
0,20	0,000172	0,000256	0,000540	0,002030	0,57	0,000158	0,000213	0,000345	0,000894
0,21	0,000171	0,000253	0,000526	0,001947	0,58	0,000158	0,000213	0,000343	0,000883
0,22	0,000170	0,000250	0,000513	0,001871	0,59	0,000158	0,000213	0,000342	0,000873
0,23	0,000170	0,000248	0,000501	0,001802	0,60	0,000158	0,000212	0,000340	0,000863
0,24	0,000169	0,000245	0,000490	0,001738	0,61	0,000157	0,000212	0,000338	0,000854
0,25	0,000168	0,000243	0,000480	0,001680	0,62	0,000157	0,000211	0,000337	0,000845
0,26	0,000167	0,000241	0,000471	0,001626	0,63	0,000157	0,000211	0,000335	0,000836
0,27	0,000167	0,000239	0,000462	0,001576	0,64	0,000157	0,000211	0,000334	0,000827
0,28	0,000166	0,000237	0,000454	0,001530	0,65	0,000157	0,000210	0,000332	0,000818
0,29	0,000166	0,000236	0,000447	0,001487	0,66	0,000157	0,000210	0,000331	0,000810
0,30	0,000165	0,000234	0,000440	0,001447	0,67	0,000157	0,000210	0,000330	0,000802
0,31	0,000165	0,000233	0,000434	0,001409	0,68	0,000157	0,000210	0,000328	0,000795
0,32	0,000164	0,000232	0,000428	0,001374	0,69	0,000157	0,000209	0,000327	0,000787
0,33	0,000164	0,000230	0,000422	0,001341	0,70	0,000156	0,000209	0,000326	0,000780
0,34	0,000163	0,000229	0,000416	0,001309	0,71	0,000156	0,000209	0,000325	0,000773
0,35	0,000163	0,000228	0,000411	0,001280	0,72	0,000156	0,000208	0,000323	0,000766
0,36	0,000163	0,000227	0,000407	0,001252	0,73	0,000156	0,000208	0,000322	0,000759
0,37	0,000162	0,000226	0,000402	0,001226	0,74	0,000156	0,000208	0,000321	0,000753

VALEURS de R.	VALEURS DE $\frac{RI}{u^2}$.				VALEURS de R.	VALEURS DE $\frac{RI}{u^2}$.			
	Parois très unies.	Parois unies.	Parois peu unies.	Parois en terre.		Parois très unies.	Parois unies.	Parois peu unies.	Parois en terre.
0,75	0,000 156	0,000 208	0,000 320	0,000 747	1,54	0,000 153	0,000 199	0,000 279	0,000 507
0,76	0,000 156	0,000 208	0,000 319	0,000 741	1,56	0,000 153	0,000 199	0,000 278	0,000 504
0,77	0,000 156	0,000 207	0,000 318	0,000 735	1,58	0,000 153	0,000 198	0,000 278	0,000 502
0,78	0,000 156	0,000 207	0,000 317	0,000 729	1,60	0,000 153	0,000 198	0,000 277	0,000 499
0,79	0,000 156	0,000 207	0,000 316	0,000 723	1,62	0,000 153	0,000 198	0,000 277	0,000 496
0,80	0,000 156	0,000 207	0,000 315	0,000 718	1,64	0,000 153	0,000 198	0,000 277	0,000 493
0,81	0,000 156	0,000 206	0,000 314	0,000 712	1,66	0,000 153	0,000 198	0,000 276	0,000 491
0,82	0,000 155	0,000 206	0,000 313	0,000 707	1,68	0,000 153	0,000 198	0,000 276	0,000 488
0,83	0,000 155	0,000 206	0,000 312	0,000 702	1,70	0,000 153	0,000 198	0,000 275	0,000 486
0,84	0,000 155	0,000 206	0,000 311	0,000 697	1,72	0,000 153	0,000 198	0,000 275	0,000 483
0,85	0,000 155	0,000 206	0,000 311	0,000 692	1,74	0,000 153	0,000 198	0,000 274	0,000 481
0,86	0,000 155	0,000 205	0,000 310	0,000 687	1,76	0,000 153	0,000 198	0,000 274	0,000 479
0,87	0,000 155	0,000 205	0,000 309	0,000 682	1,78	0,000 153	0,000 197	0,000 274	0,000 477
0,88	0,000 155	0,000 205	0,000 308	0,000 678	1,80	0,000 153	0,000 197	0,000 273	0,000 474
0,89	0,000 155	0,000 205	0,000 307	0,000 673	1,82	0,000 152	0,000 197	0,000 273	0,000 472
0,90	0,000 155	0,000 205	0,000 307	0,000 669	1,84	0,000 152	0,000 197	0,000 273	0,000 470
0,91	0,000 155	0,000 205	0,000 306	0,000 665	1,86	0,000 152	0,000 197	0,000 272	0,000 468
0,92	0,000 155	0,000 204	0,000 305	0,000 660	1,88	0,000 152	0,000 197	0,000 272	0,000 466
0,93	0,000 155	0,000 204	0,000 305	0,000 656	1,90	0,000 152	0,000 197	0,000 272	0,000 464
0,94	0,000 155	0,000 204	0,000 304	0,000 652	1,92	0,000 152	0,000 197	0,000 271	0,000 462
0,95	0,000 155	0,000 204	0,000 303	0,000 648	1,94	0,000 152	0,000 197	0,000 271	0,000 460
0,96	0,000 155	0,000 204	0,000 303	0,000 645	1,96	0,000 152	0,000 197	0,000 271	0,000 459
0,97	0,000 155	0,000 204	0,000 302	0,000 641	1,98	0,000 152	0,000 197	0,000 270	0,000 457
0,98	0,000 155	0,000 204	0,000 301	0,000 637	2,00	0,000 152	0,000 197	0,000 270	0,000 455
0,99	0,000 155	0,000 203	0,000 301	0,000 634	2,10	0,000 152	0,000 196	0,000 269	0,000 447
1,00	0,000 155	0,000 203	0,000 300	0,000 630	2,20	0,000 152	0,000 196	0,000 267	0,000 439
1,02	0,000 154	0,000 203	0,000 299	0,000 623	2,30	0,000 152	0,000 196	0,000 266	0,000 432
1,04	0,000 154	0,000 203	0,000 298	0,000 617	2,40	0,000 152	0,000 196	0,000 265	0,000 426
1,06	0,000 154	0,000 203	0,000 297	0,000 610	2,50	0,000 152	0,000 195	0,000 264	0,000 420
1,08	0,000 154	0,000 202	0,000 296	0,000 604	2,60	0,000 152	0,000 195	0,000 263	0,000 415
1,10	0,000 154	0,000 202	0,000 295	0,000 598	2,70	0,000 152	0,000 195	0,000 262	0,000 410
1,12	0,000 154	0,000 202	0,000 294	0,000 592	2,80	0,000 152	0,000 195	0,000 261	0,000 405
1,14	0,000 154	0,000 202	0,000 293	0,000 587	2,90	0,000 152	0,000 195	0,000 261	0,000 401
1,16	0,000 154	0,000 201	0,000 292	0,000 582	3,00	0,000 152	0,000 194	0,000 260	0,000 397
1,18	0,000 154	0,000 201	0,000 291	0,000 577	3,10	0,000 151	0,000 194	0,000 259	0,000 393
1,20	0,000 154	0,000 201	0,000 290	0,000 572	3,20	0,000 151	0,000 194	0,000 259	0,000 389
1,22	0,000 154	0,000 201	0,000 289	0,000 567	3,30	0,000 151	0,000 194	0,000 258	0,000 386
1,24	0,000 154	0,000 201	0,000 288	0,000 562	3,40	0,000 151	0,000 194	0,000 258	0,000 383
1,26	0,000 154	0,000 201	0,000 288	0,000 558	3,50	0,000 151	0,000 194	0,000 257	0,000 380
1,28	0,000 154	0,000 200	0,000 287	0,000 553	3,60	0,000 151	0,000 194	0,000 257	0,000 377
1,30	0,000 153	0,000 200	0,000 286	0,000 549	3,70	0,000 151	0,000 194	0,000 256	0,000 375
1,32	0,000 153	0,000 200	0,000 285	0,000 545	3,80	0,000 151	0,000 194	0,000 256	0,000 372
1,34	0,000 153	0,000 200	0,000 285	0,000 541	3,90	0,000 151	0,000 193	0,000 255	0,000 370
1,36	0,000 153	0,000 200	0,000 284	0,000 537	4,00	0,000 151	0,000 193	0,000 255	0,000 368
1,38	0,000 153	0,000 200	0,000 283	0,000 534	4,25	0,000 151	0,000 193	0,000 254	0,000 362
1,40	0,000 153	0,000 199	0,000 283	0,000 530	4,50	0,000 151	0,000 193	0,000 253	0,000 358
1,42	0,000 153	0,000 199	0,000 282	0,000 526	4,75	0,000 151	0,000 193	0,000 253	0,000 354
1,44	0,000 153	0,000 199	0,000 282	0,000 523	5,00	0,000 151	0,000 193	0,000 252	0,000 350
1,46	0,000 153	0,000 199	0,000 281	0,000 520	5,25	0,000 151	0,000 193	0,000 251	0,000 347
1,48	0,000 153	0,000 199	0,000 281	0,000 516	5,50	0,000 151	0,000 192	0,000 251	0,000 344
1,50	0,000 153	0,000 199	0,000 280	0,000 513	5,75	0,000 151	0,000 192	0,000 250	0,000 341
1,52	0,000 153	0,000 199	0,000 279	0,000 510	6,00	0,000 151	0,000 192	0,000 250	0,000 338

176. Relations entre la vitesse moyenne, la vitesse maxima à la surface et la vitesse au fond d'un cours d'eau. Des expériences de

Dubuat (171), de Prony a conclu la formule empirique :

$$\frac{v}{V} = \frac{V + 2,37187}{V + 3,15312}, \quad \text{soit} \quad \frac{v}{V} = \frac{V + 2,372}{V + 3,153}. \qquad (a)$$

v vitesse moyenne (171);
V vitesse à la surface, prise au point où se trouve le *fil de l'eau*, c'est-à-dire au point où elle est la plus grande; cette vitesse maxima correspond généralement à la plus grande profondeur de l'eau.

De cette formule, on déduit pour :

$V =$	$0^m,05$	$0^m,10$	$0^m,50$	$1^m,00$	$1^m,50$	$2^m,00$	$2^m,50$	$3^m,00$	$3^m,50$	$4^m,00$,
$\frac{v}{V} =$	0,756	0,760	0,786	0,812	0,832	0,848	0,862	0,873	0,883	0,891.

Pour des vitesses à la surface comprises entre $0^m,20$ et $1^m,50$, on peut supposer $v = \frac{4}{5} V = 0,80 V$, ou $V = 1,25 v$.

La formule précédente donne pour v des valeurs trop grandes lorsqu'il s'agit de grands cours d'eau; ainsi, des expériences directes faites sur la Seine ont donné $v = 0,62 V$, et d'autres exécutées par Raucourt sur la Newa ont fourni $v = 0,75 V$.

Le *filet doué de la vitesse moyenne* a été trouvé moyennement un peu au-dessous de la moitié, vers les 3/5 de la profondeur.

Des ingénieurs allemands ont trouvé que le rapport entre la vitesse moyenne de tous les filets rencontrés par une même verticale et la vitesse à la partie supérieure de la verticale variait de 0,88 à 0,90; des expériences faites sur le Rhin, par M. Defontaine, ont donné moyennement 0,88 pour ce rapport.

Dubuat a conclu de ses expériences (171) que l'on avait, en représentant par U la vitesse au fond d'un canal :

$$U = 2v - V; \qquad (b)$$

d'où l'on tire, en faisant $V = 1,25 v$:

$$U = 0,75 v, \quad \text{ou} \quad v = 1,33 U.$$

Pour l'établissement d'un canal, on se donnera la vitesse U, telle que les parois ne soient pas dégradées; on en conclura la vitesse moyenne v qu'il ne faudra pas dépasser, et, à l'aide de l'une des formules du n° 171, on déterminera les quantités qui sont encore inconnues.

Tableau des valeurs de U auxquelles le fond des canaux commence à être entraîné, pour différentes natures de sols

Terres détrempées, brunes	$0^m,076$
Argiles tendres	0 ,152
Sables	0 ,305
Graviers	0 ,609
Cailloux	0 ,614
Pierres cassées, silex	1 ,220
Cailloux agglomérés ou poudingues, schistes tendres	1 ,520
Roches en couches	1 ,830
Roches dures	3 ,050

Pour un *canal de navigation*, afin de rendre autant que possible la résistance au mouvement des bateaux la même dans les deux sens, il convient que la vitesse de l'eau soit très faible; mais si le canal alimente la distribution d'eau de quelques villes, la vitesse doit être suffisamment grande, afin d'éviter la décomposition des matières végétales; ainsi les eaux du canal de l'Ourcq ont une vitesse $v = 0^m,30$ dans l'arrondissement de Meaux, et $v = 0^m,25$ dans celui de Paris. La pente pour obtenir ces vitesses est donnée par la formule (b) ou (b') du n° 171; mais il convient ordinairement de l'augmenter un peu pour tenir compte de l'influence retardatrice des herbes qui croissent dans les canaux.

Pour un *canal d'usine*, afin de ménager la chute, on doit rendre la pente aussi petite que possible, mais telle cependant qu'il ne se forme pas de dépôts. Si, dans les faibles crues, la rivière charrie des limons ou des sables légers, il convient que la vitesse v soit de $0^m,20$ à $0^m,26$ dans le premier cas et de $0^m,40$ dans le second. Dans les conditions ordinaires v varie de $0^m,25$ à $0^m,30$, et U de $0^m,19$ à $0^m,23$, si toutefois le sol peut résister à ces vitesses.

Pour les *canaux et rigoles d'irrigation*, si les eaux sont toujours claires, on adopte de préférence des pentes très faibles de 3 à 4 millimètres par mètre. Si les eaux sont limoneuses, fertilisantes, comme dans certaines contrées du Midi et de la Meuse, il convient, au lieu de les laisser déposer dans les rigoles, qui seraient bientôt obstruées, de les répandre autant que possible sur toute la surface des prés, et l'on adopte ordinairement une pente de 5 à 6 millimètres, qu'on a parfois portée à 9 millimètres. Enfin si les eaux entraînent ordinairement des sables fins, comme dans les vallées voisines des Vosges, avec une forte pente, ces sables sont entraînés par les rigoles et déposés sur les prés, et si la pente est faible, comme ils ne sont entraînés que quand la vitesse de l'eau est de $0^m,305$ environ, ils obstruent promptement les canaux; ce dernier inconvénient étant le moins grave, il y a lieu d'adopter une pente de 6 à 8 millimètres, et de curer les canaux et les rigoles quand cela est nécessaire.

Lorsqu'un canal est tapissé de joncs, v paraît s'abaisser de 0,80V à 0,60V au plus. Le tableau suivant contient les valeurs de RI et de V observées par Dubuat sur le canal du Jard, près Condé, avant et après le faucardement des joncs. On y a ajouté les valeurs de v tirées de la formule (b') du n° 171, ainsi que celles du rapport $\frac{v}{V}$; c'est par ce rapport, et non par $0^m,60$ ou même $0^m,80$, qu'on devra multiplier la vitesse observée V pour avoir la valeur de v à introduire dans la formule (b') pour en conclure la valeur de RI.

	JONCS NON COUPÉS.		JONCS COUPÉS.			
RI =	0,0001226	0,0000868	0,0000185	0,0000286	0,0000214	0,0000513
V =	0m,472	0m,329	0m,197	0m,260	0m,211	0m,426
v =	0m,557	0m,457	0m,217	0m,232	0m,191	0m,335
$\frac{v}{V}$ =	1,180	1,389	1,101	0,892	0,905	0,786

La formule précédente (a), que de Prony a déduite des expériences faites par Dubuat sur des petits canaux en bois, ne peut convenir à tous les cas; c'est ce que montrent les résultats obtenus sur la Seine et sur la Newa; et des études de Darcy et Bazin il résulte que le rapport $\frac{v}{V}$ varie beaucoup avec la résistance des parois, c'est-à-dire avec la nature de ces parois, et comme le montre la table suivante, surtout pour les petites valeurs de R.

Quoique dans les cours d'eau les filets animés de la vitesse maximum soient en général très près de la surface, cependant, dans les courants profonds, ces filets se trouvent au-dessous de la surface, à une distance d'autant plus grande que la profondeur est plus considérable par rapport à la largeur. Sur un grand cours d'eau, comme le Rhin, un bateau chargé ayant un grand tirant d'eau prend, en descendant, une plus grande vitesse que l'eau à la surface ou que les corps flottants.

Il suit de là que les observations faites avec des flotteurs ne donnent pas exactement la vitesse maximum du cours d'eau, à moins qu'ils ne soient convenablement immergés.

A l'inverse, si le cours d'eau n'a qu'une petite profondeur, la plus grande vitesse étant très près de la surface, les flotteurs doivent être minces; mais alors il est très difficile de contrôler leurs indications par celles du tube jaugeur, qui ne sont exactes que quand ce tube est suffisamment immergé.

Bazin, en choisissant parmi les séries d'expériences dont il disposait, celles qui étaient le moins exposées aux anomalies résultant des deux causes principales précédentes, et de quelques autres moins importantes, et en discutant les résultats de ces expériences, a conclu que le rapport $\frac{v}{V}$ dépendait de celui $\frac{RI}{v^2}$, auquel il l'a relié par la formule :

$$\frac{v}{V} = \frac{1}{1 + K\sqrt{\frac{RI}{v^2}}}.$$

$\frac{RI}{v^2}$ prend, selon la nature des parois, les valeurs de la table page 131;

K coefficient dont la valeur varie un peu avec celle de $\frac{RI}{v^2}$, mais qui s'éloigne peu de

la valeur moyenne 14,1, ou plus simplement 14, tant que $\frac{RI}{v^2}$ n'excède pas 0,001, ce qui est le cas le plus général. La formule précédente appliquée à 18 expériences dans lesquelles $\frac{RI}{v^2}$ dépasse 0,001 donne des erreurs dont la moyenne n'atteint pas les 0,03 de la vitesse moyenne v observée. L'erreur donnée par la formule de Prony s'élève en moyenne à 0,186 de v, et parfois elle atteint plus de la moitié de la valeur de v déduite de l'expérience.

Ainsi la relation entre la vitesse maximum V observée près de la surface, à l'aide de flotteurs ou d'autres moyens, et la vitesse moyenne v peut être représentée, avec une exactitude suffisante pour les applications, par la formule :

$$\frac{v}{V} = \frac{1}{1 + 14\sqrt{\frac{RI}{v^2}}};$$

d'où : $$V - v = 14\sqrt{RI} \quad \text{ou} \quad v = V - 14\sqrt{RI}.$$

Lorsqu'il s'agit du jaugeage d'un cours d'eau, on détermine par l'observation directe les quantités V, R et I, et la formule précédente donne la vitesse moyenne v, qu'il suffit de multiplier par la section transversale pour avoir le débit.

177. La table suivante donne, pour les 4 natures de parois-types énoncées n° 174, les valeurs de $\frac{v}{V}$. En désignant ces valeurs par a, on a :

$$\frac{v}{V} = a, \quad \text{d'où} \quad v = aV \quad \text{et} \quad V = \frac{v}{a}.$$

Tableau des valeurs du rapport $\frac{v}{V}$ de la vitesse moyenne v à la valeur maxima V correspondant aux valeurs du rayon moyen R comprises entre $0^m,01$ et $6^m,00$.

VALEURS de R.	VALEURS DE $\frac{v}{V}$. Parois très unies.	Parois unies.	Parois peu unies.	Parois en terre.	VALEURS de R.	VALEURS DE $\frac{v}{V}$. Parois très unies.	Parois unies.	Parois peu unies.	Parois en terre.
0,01	0,745	»	»	»	0,62	0,851	0,831	0,796	0,711
0,02	0,787	0,710	»	»	0,64	0,851	0,831	0,796	0,713
0,03	0,805	0,740	»	»	0,66	0,851	0,831	0,797	0,715
0,04	0,815	0,758	»	»	0,68	0,851	0,831	0,798	0,717
0,05	0,822	0,770	0,653	»	0,70	0,851	0,832	0,798	0,719
0,06	0,826	0,779	0,670	»	0,72	0,851	0,832	0,799	0,721
0,07	0,830	0,786	0,683	»	0,74	0,851	0,832	0,799	0,723
0,08	0,833	0,791	0,694	»	0,76	0,851	0,832	0,800	0,724
0,09	0,835	0,795	0,703	»	0,78	0,851	0,832	0,800	0,726
0,10	0,836	0,799	0,711	0,537	0,80	0,851	0,832	0,801	0,727
0,11	0,838	0,802	0,718	0,548	0,82	0,851	0,833	0,801	0,729
0,12	0,839	0,805	0,724	0,558	0,84	0,851	0,833	0,802	0,730
0,13	0,840	0,807	0,729	0,567	0,86	0,851	0,833	0,802	0,732
0,14	0,841	0,809	0,734	0,575	0,88	0,852	0,833	0,803	0,733
0,15	0,842	0,811	0,738	0,583	0,90	0,852	0,833	0,803	0,734
0,16	0,843	0,812	0,742	0,590	0,92	0,852	0,833	0,803	0,735
0,17	0,843	0,814	0,746	0,596	0,94	0,852	0,833	0,804	0,737
0,18	0,844	0,815	0,749	0,602	0,96	0,852	0,833	0,804	0,738
0,19	0,844	0,816	0,752	0,608	0,98	0,852	0,834	0,804	0,739
0,20	0,845	0,817	0,755	0,613	1,00	0,852	0,834	0,805	0,740
0,21	0,845	0,818	0,757	0,618	1,05	0,852	0,834	0,806	0,743
0,22	0,845	0,819	0,759	0,623	1,10	0,852	0,834	0,806	0,745
0,23	0,846	0,819	0,761	0,627	1,15	0,852	0,834	0,807	0,747
0,24	0,846	0,820	0,763	0,631	1,20	0,852	0,834	0,807	0,749
0,25	0,846	0,821	0,765	0,635	1,25	0,852	0,835	0,808	0,751
0,26	0,847	0,822	0,767	0,639	1,30	0,852	0,835	0,809	0,753
0,27	0,847	0,822	0,769	0,643	1,35	0,852	0,835	0,809	0,755
0,28	0,847	0,823	0,770	0,646	1,40	0,852	0,835	0,809	0,756
0,29	0,847	0,823	0,772	0,649	1,45	0,852	0,835	0,810	0,758
0,30	0,848	0,824	0,773	0,653	1,50	0,852	0,835	0,810	0,759
0,31	0,848	0,824	0,774	0,655	1,55	0,852	0,835	0,811	0,760
0,32	0,848	0,824	0,776	0,658	1,60	0,852	0,835	0,811	0,762
0,33	0,848	0,825	0,777	0,661	1,65	0,853	0,835	0,811	0,763
0,34	0,848	0,825	0,778	0,664	1,70	0,853	0,835	0,811	0,764
0,35	0,848	0,825	0,779	0,666	1,75	0,853	0,836	0,812	0,765
0,36	0,849	0,826	0,780	0,669	1,80	0,853	0,836	0,812	0,766
0,37	0,849	0,826	0,781	0,671	1,85	0,853	0,836	0,812	0,767
0,38	0,849	0,826	0,782	0,673	1,90	0,853	0,836	0,813	0,768
0,39	0,849	0,827	0,783	0,676	1,95	0,853	0,836	0,813	0,769
0,40	0,849	0,827	0,783	0,678	2,00	0,853	0,836	0,813	0,770
0,41	0,849	0,827	0,784	0,680	2,20	0,853	0,836	0,814	0,773
0,42	0,849	0,827	0,785	0,682	2,40	0,853	0,836	0,814	0,776
0,43	0,849	0,828	0,786	0,684	2,60	0,853	0,836	0,815	0,778
0,44	0,849	0,828	0,786	0,685	2,80	0,853	0,837	0,815	0,780
0,45	0,850	0,828	0,787	0,687	3,00	0,853	0,837	0,816	0,782
0,46	0,850	0,828	0,788	0,689	3,20	0,853	0,837	0,816	0,784
0,47	0,850	0,829	0,788	0,690	3,40	0,853	0,837	0,816	0,785
0,48	0,850	0,829	0,789	0,692	3,60	0,853	0,837	0,817	0,786
0,49	0,850	0,829	0,790	0,694	3,80	0,853	0,837	0,817	0,787
0,50	0,850	0,829	0,790	0,695	4,00	0,853	0,837	0,817	0,788
0,52	0,850	0,829	0,791	0,698	4,50	0,853	0,837	0,818	0,791
0,54	0,850	0,830	0,792	0,701	5,00	0,853	0,837	0,818	0,792
0,56	0,850	0,830	0,793	0,704	5,50	0,853	0,837	0,818	0,794
0,58	0,850	0,830	0,794	0,706	6,00	0,853	0,837	0,819	0,795
0,60	0,851	0,831	0,795	0,709					

178. Influence de la résistance que l'air exerce sur la surface d'un cours d'eau. *Répartition des vitesses dans l'intérieur d'un cours d'eau.* Par un tuyau rectangulaire de $0^m,80$ de largeur sur $0^m,50$ de hauteur, établi par Darcy en 1857, et par un autre de $0^m,48$ de largeur sur $0^m,30$ de hauteur, établi par Bazin en 1859, on détermina d'abord les débits par un écoulement à gueule-bée sous une pente déterminée I; puis on enleva la paroi supérieure des tuyaux de manière à en faire des canaux à ciel ouvert, et réglant le fond suivant la première pente I, on fit couler l'eau de manière que le niveau s'élevât au-dessus du fond à une hauteur égale à la moitié de la hauteur du tuyau avant l'enlèvement de la paroi supérieure. Les débits dans les secondes expériences pouvant être considérés comme étant égaux à la moitié des débits des tuyaux de section double, on en a conclu que l'air n'oppose pas au mouvement de l'eau une résistance assez notable pour contrarier l'écoulement, du moins en ce qui concerne le volume d'eau débité. Ces expériences ont du reste été faites par un temps calme.

Si le débit n'est pas modifié, il n'en est pas de même, à beaucoup près, quant à la répartition des vitesses des filets fluides qui traversent une même section. Des expériences nombreuses faites par Bazin, à l'aide du tube jaugeur de Darcy, montrent que la répartition des vitesses dans les tuyaux fermés se fait avec la plus grande symétrie, soit par rapport au plan vertical passant par l'axe du tuyau, soit par rapport au plan horizontal passant par cet axe. Les courbes rencontrant les filets animés de la même vitesse sont des courbes fermées et symétriques qui se rapprochent d'autant plus de la forme de rectangles à angles arrondis et à côtés parallèles aux parois du tuyau, qu'elles se rapportent à des filets plus voisins de ces parois.

Bazin a trouvé qu'il en était tout autrement pour les canaux découverts. Les courbes des filets d'égale vitesse les plus voisines des parois sont bien des demi-rectangles dont les côtés verticaux s'arrêtent à peu près à angle droit à la surface; mais, à mesure qu'on s'éloigne des parois et que, par suite, les vitesses augmentent, ces courbes tendent de plus en plus à se fermer vers leur partie supérieure en venant rencontrer la surface sous des angles de plus en plus aigus, et même quand la profondeur du courant atteint ou dépasse le 1/3 de la largeur du canal, les courbes les plus voisines du milieu, celles où la vitesse est la plus grande, se ferment complètement, et limitent ainsi un noyau fluide central dont tous les filets possèdent une vitesse supérieure à celle de tous les filets de la surface. Cette tendance des courbes à se fermer est d'autant plus sensible que la résistance des parois est plus considérable ou que les vitesses sont moindres.

Des effets analogues se manifestent avec tous les profils de canaux, et la forme seule de ces courbes est influencée par celle du canal.

La courbe des filets animés de la vitesse moyenne ne présente pas de circonstances particulières. Elle est plus rapprochée des parois dans le canal ouvert que dans le tuyau fermé.

De tels changements dans la répartition de la vitesse ne peuvent être

attribués à la résistance de l'air, qui était à peu près nulle, mais à des mouvements intérieurs du fluide. Dans un tuyau, la symétrie et l'invariabilité de la section établissent entre toutes les molécules du courant une sorte de solidarité qui contribue à régulariser les vitesses ; à ciel ouvert, au contraire, l'absence de pression sur la surface du courant, le défaut de symétrie de la section qui peut librement augmenter ou diminuer au milieu des secousses incessantes dont aucun courant n'est exempt, favorisent sans doute la production des mouvements tumultueux qu'on observe dans les couches supérieures, et qui doivent exister, quoique à un moindre degré, dans toutes les autres.

De nombreuses figures dessinées par Bazin montrent combien la distribution des vitesses est compliquée et combien elle paraît varier dans chaque cas particulier. Aussi le problème pris dans toute sa généralité n'est-il peut-être pas susceptible d'une solution. Deux cas simples conduisent seuls à un résultat un peu précis ; ce sont : 1° un canal rectangulaire de largeur indéfinie, dans lequel l'action des parois latérales peut être complètement négligée ; 2° un canal demi-circulaire.

Dans le premier cas, les courbes d'égale vitesse sont des lignes droites parallèles au fond ; dans le second, ce sont des demi-circonférences concentriques à la paroi. La complication qu'introduit nécessairement le contour discontinu des sections rectangulaires et trapézoïdales se trouve ainsi écartée, et la loi de décroissance des vitesses peut être représentée par une formule, du moins tant que la vitesse d'écoulement est assez grande : car dès qu'elle descend au-dessous d'une certaine limite, le maximum de vitesse n'est plus à la surface, et l'on retombe dans une nouvelle complication.

Pour un canal à section rectangulaire de largeur indéfinie, on a :

$$V - u = K\sqrt{HI}\left(\frac{h}{H}\right)^2, \quad \text{d'où} \quad u = V - K\sqrt{HI}\left(\frac{h}{H}\right)^2.$$

V vitesse à la surface ;
u vitesse à la profondeur h ;
H profondeur totale du canal ;
I pente par mètre ;
K coefficient qui paraît devoir être égal à environ 24. Lorsque la largeur du canal, sans être indéfinie, est supérieure à 5 fois la profondeur H, la formule précédente est encore applicable, mais en faisant K = 20 ; la vitesse V étant mesurée au milieu du canal, en un point aussi rapproché que possible de la surface, on suppose ce point situé à la surface, bien qu'il soit ordinairement à 2 ou 3 centimètres au-dessous.

Il convient de remarquer que les canaux qui ont fourni la valeur 20 pour K ne présentaient que des profondeurs d'eau comprises entre 0m,084 et 0m,380, avec des vitesses moyennes comprises entre 2m,573 et 0m,643, c'est-à-dire entre des limites trop restreintes pour qu'on puisse dire d'une manière absolue que la formule précédente représente la loi de la variation des vitesses.

Pour un canal demi-circulaire, on a :

$$V - u = K\sqrt{RI}\left(\frac{r}{R}\right)^3, \quad \text{d'où} \quad u = V - K\sqrt{RI}\left(\frac{r}{R}\right)^3.$$

V vitesse à la surface au milieu du canal;
u vitesse en un point situé à la distance r du centre;
R rayon du canal;
I pente par mètre;
K coefficient égal à 21.

En opérant sur les tuyaux de conduite, Darcy a obtenu, en 1851, l'équation un peu différente :

$$V - u = K\sqrt{RI}\left(\frac{r}{R}\right)^{\frac{3}{2}},$$

dans laquelle il a fait $K = 11,3$.

Ces deux dernières formules prouvent encore, par leur différence, que l'écoulement à ciel ouvert ne peut être assimilé à l'écoulement dans un tuyau fermé.

179. Dans le numéro de septembre 1875 des *Annales des ponts et chaussées*, Bazin a publié un article intitulé : *Discussion des expériences les plus récentes sur la distribution des vitesses dans un courant*. De cet article nous extrayons ce qui suit :

Les hydrauliciens admettent généralement aujourd'hui que les vitesses sur une même verticale varient comme les ordonnées d'une parabole; la plus grande vitesse étant tantôt à la surface, tantôt au-dessous, sans que l'on ait pu jusqu'ici se rendre bien compte des causes qui font varier sa position. D'après cette loi parabolique, on a :

$$u = V - M\left(\frac{h - h'}{H}\right)^2.$$

u vitesse en un point donné d'une verticale;
V vitesse maximum;
h profondeur du point donné au-dessous de la surface
h' distance du sommet de la parabole à la surface;
H profondeur totale;
M paramètre.

Représentant

$\frac{h}{H}$ par x, et $\frac{h'}{H}$ par α,

la formule précédente devient :

$$u = V - M(x - \alpha)^2. \qquad (1)$$

v étant la moyenne de toutes les vitesses sur la verticale, on a :

$$v = \int_0^1 [V - M(x - \alpha)^2]\,dx = V - M\left(\frac{1}{3} - \alpha + \alpha^2\right). \qquad (2)$$

L'expérience assignant des valeurs presque invariables aux rapports $\frac{V}{v}$ et $\frac{U}{v}$,

U vitesse du fond,

M doit croître avec α de manière à maintenir à peu près constante la différence $\frac{V}{v} - \frac{U}{v}$. On satisfait à cette condition en remplaçant M par $\frac{M}{(1-\alpha)^2}$ dans l'équation (1), qui devient :

$$u = V - \frac{M}{(1-\alpha)^2}(x-\alpha)^2. \qquad (3)$$

La discussion des résultats fournis par les expériences exécutées à l'aide du tube jaugeur de Darcy sur des canaux très réguliers de 2 mètres environ de largeur, donne $M = 20\sqrt{HI}$. Par suite la formule (3) devient :

$$u = V - \frac{20\sqrt{HI}}{(1-\alpha)^2}(x-\alpha)^2. \qquad (4)$$

I pente du canal par mètre.

Cette dernière formule peut s'écrire sous une forme un peu différente qui sera souvent préférable; divisons les deux membres par v, elle devient :

$$\frac{u}{v} = \frac{V}{v} - 20\sqrt{\frac{HI}{v^2}}\left(\frac{x-\alpha}{1-\alpha}\right)^2.$$

Dans un cours d'eau de très grande largeur où l'influence des parois latérales serait négligeable, H se confondrait avec le rayon moyen R, v avec la vitesse moyenne v_1 calculée pour toute l'étendue de la section transversale, et le rapport $\frac{HI}{v^2}$ se réduisant par suite au coefficient connu $\frac{RI}{v_1^2}$ que nous désignerons par A, l'équation de la parabole pourrait s'écrire :

$$\frac{u}{v} = \frac{V}{v} - \frac{20\sqrt{A}}{(1-\alpha)^2}(x-\alpha)^2. \qquad (5)$$

Sous cette dernière forme, elle ne contient plus que des rapports; elle est par conséquent plus propre à donner une idée exacte de la répartition des vitesses, leurs rapport étant ce qu'il importe de connaître et non leurs valeurs absolues variables dans chaque cas particulier.

D'un autre côté, la formule (2) qui lie les vitesses moyennes et maxi-

mum peut s'écrire :

$$\frac{V}{v} = 1 + \frac{M}{v}\left(\frac{1}{3} - \alpha + \alpha^2\right);$$

ou en remplaçant $\frac{M}{v}$ par sa nouvelle valeur :

$$\frac{M}{v} \times \frac{1}{(1-\alpha)^2} = 20\sqrt{\frac{HI}{v^2}} \times \frac{1}{(1-\alpha)^2} = \frac{20\sqrt{A}}{(1-\alpha)^2},$$

$$\frac{V}{v} = 1 + \frac{20\sqrt{A}}{(1-\alpha)^2}\left(\frac{1}{3} - \alpha + \alpha^2\right). \qquad (6)$$

Cette formule assigne au rapport $\frac{V}{v}$ des valeurs croissantes avec A; le facteur qui multiplie $\sqrt{A}$ restant toujours compris entre $\frac{1}{3}$ et $\frac{1}{4}$, elles varient peu avec α, ainsi qu'on le constate en les calculant pour les valeurs les plus ordinaires de $\sqrt{A}$.

VALEURS de $\sqrt{A}$	VALEURS DE $\frac{V}{v}$ POUR				
	$\alpha = 0$	$\alpha = \frac{1}{10}$	$\alpha = \frac{1}{5}$	$\alpha = \frac{1}{3}$ (minimum)	$\alpha = \frac{1}{2}$
0,015	1,100	1,090	1,081	1,075	1,100
0,020	1,133	1,120	1,108	1,100	1,133
0,025	1,167	1,150	1,135	1,125	1,167

Appliquant les formules (5) et (6) à quinze expériences, le coefficient $\sqrt{A}$ étant connu pour chacune d'elles, ainsi que α, on en déduit les rapports $\frac{V}{v}$ et les paramètres $\frac{20\sqrt{A}}{(1-\alpha)^2}$ correspondants.

On trouve ainsi que le rapport $\frac{V}{v}$ varie entre les limites extrêmes 1,09 et 1,19, suivant que la paroi du canal est unie ou très rugueuse. Toutes choses égales d'ailleurs, ce rapport diminue un peu dès que la vitesse maximum est au-dessous de la surface. Lorsque $\sqrt{A} = 0,02$, on a $\frac{V}{v} = 1,10$ à $1,13$; c'est la valeur que nous retrouverons plus loin pour les grands cours d'eau.

180. **Expériences faites en Europe sur les grands cours d'eau.** La mesure des vitesses dans un cours d'eau considérable présente de sérieuses difficultés. Le moulinet employé pour les expériences que nous allons rapporter fonctionne parfaitement près de la surface; mais si l'on

cherche à pénétrer dans les couches profondes du courant, les vibrations et la flexion de la tige qui porte l'instrument en faussent souvent la marche. Cet inconvénient est surtout sensible dans le voisinage du fond : si le moulinet en est trop rapproché, il ne fonctionne plus que d'une manière irrégulière, et l'on obtient des vitesses visiblement trop faibles.

Les expériences dont il s'agit de comparer les résultats sont au nombre de douze, savoir :

1° Sept expériences sur la Saône, exécutées en 1859 à Raconnay, à 19 kilomètres en amont de Chalon, sous la direction de M. Léveillé. Elles ont eu lieu sur un seul et même profil; les vitesses ont été mesurées sur des verticales régulièrement espacées de 20 mètres et sur chacune en cinq points, les deux points extrêmes étant aussi voisins que possible de la surface et du fond, et les trois autres également espacés partageant par quarts la profondeur totale.

2° Une expérience faite sur la Seine à Meulan, en 1852, sous la direction de M. Emmery; les mesures de vitesses, au lieu de partager toutes les verticales en parties proportionnelles, sont distribuées sur des horizontales distantes de $0^m,50$.

3° Deux expériences de M. Baumgarten, sur la Garonne; elles ont eu lieu, l'une en 1845, à 2 kilomètres en amont de Marmande, l'autre en 1841, à 21 kilomètres en aval; les mesures de vitesses sont irrégulièrement espacées, ce qui rend leur comparaison moins facile.

4° Une expérience de M. Defontaine, sur un bras du Rhin, à Kehl.

5° Une expérience exécutée en 1867, sur le Rhin, à Bâle, par une commission d'ingénieurs appartenant aux États limitrophes; les vitesses n'ont été mesurées que sur un petit nombre de verticales.

Les résultats fournis par ces expériences montrent que les formules (5) et (6) sont également applicables aux grands cours d'eau. Les valeurs de A sont fort peu différentes pour les rivières, et il en est à peu près de même de celles du rapport $\frac{V}{v}$: ce rapport ne varie ordinairement qu'entre 1,10 et 1,13, et il atteint, pour l'expérience sur le Rhin, à Bâle, la valeur exceptionnellement élevée 1,17 en raison de l'état particulier du lit formé de gros galets. Les valeurs de $\sqrt{\frac{HI}{v^2}}$ et de $\sqrt{A}$ diffèrent moins encore que dans les expériences en petit; l'écart reste toujours au-dessous d'un vingtième. Quant au paramètre $\frac{20\sqrt{A}}{(1-\alpha)^2}$, il reste compris entre 0,40 et 0,60.

Appliquant les formules (5) et (6) à quelques-unes des expériences précédentes, on obtient les résultats du tableau suivant :

DÉSIGNATION DES EXPÉRIENCES.	VALEURS DE			ÉQUATION de la parabole théorique.	VITESSE théorique au fond.
	$\sqrt{A}$	α	$\frac{V}{v}$		
Expériences en petit.					
Parois unies en ciment, ...	0,0131	0	1,087	$\frac{u}{V}=1-0,241x^2$	$\frac{U}{V}=0,759$
Parois moins unies en planches recouvertes de liteaux espacés de 0m,01 . . . . . . série 61.	0,0184	0,30	1,092	$=1-0,688(x-0,30)^2$	$=0,663$
Parois moins unies en planches recouvertes de liteaux espacés de 0m,01 . . . . . . série 62.	0,0191	0	1,127	$=1-0,339x^2$	$=0,661$
Parois revêtues de gros gravier. . . .	0,0257	0,25	1,133	$=1-0,807(x-0,25)^2$	$=0,546$
Parois en planches revêtues de liteaux espacés de 0m,05.	0,0287	0	1,191	$=1-0,482x^2$	$=0,518$
Expériences sur les grands cours d'eau.					
Saône.	0,0204	0,15	1,116	$\frac{u}{V}=1-0,505(x-0,15)^2$	$\frac{U}{V}=0,635$
Seine.	0,0203	0	1,135	$=1-0,358x^2$	$=0,642$
Garonne (1841).	0,0190	0,20	1,103	$=1-0,538(x-0,20)^2$	$=0,656$
Id. (1845).	0,0200	0	1,133	$=1-0,353x^2$	$=0,647$
Rhin, à Bâle.	0,0260	0	1,173	$=1-0,443x^2$	$=0,557$

traçant les paraboles théoriques ayant leur sommet au point déterminé par $\alpha=\frac{h'}{H}$, et ayant pour abscisses horizontales les valeurs de $\frac{u}{V}$ et pour ordonnées verticales les profondeurs $x=\frac{h}{H}$ correspondant aux valeurs expérimentales de $\frac{u}{V}$ pour des points isolés qui ne s'écartent généralement pas d'une manière notable de ces paraboles.

L'écart extrême des vitesses, c'est-à-dire la différence $V-U$ entre la vitesse maximum V et celle du fond U, varie dans les canaux artificiels entre $\frac{1}{4}$V et $\frac{1}{2}$V et croît avec le degré de rugosité de la paroi ; on devait s'y attendre, puisque c'est à la résistance de la paroi, mesurée par le coefficient $\sqrt{A}$, qu'est due l'inégale distribution des vitesses. Dans les cours d'eau naturels, cet écart est d'environ $\frac{1}{3}$V. Il faut en excepter l'expérience sur le Rhin, à Bâle : on trouve réunies, dans cette expérience remarquable, une grande section et une grande pente, conditions fort rares qui ne peuvent coexister qu'en raison de la résistance extraordinaire du fond tapissé de gros galets ; aussi voit-on l'écart des vitesses s'accroître et atteindre presque $\frac{1}{2}$V.

Lorsque la vitesse maximum n'est plus à la surface, la différence $V-U$ ne diminuant pas, le paramètre devient nécessairement plus grand. Cette augmentation ne se présentait pas aussi naturellement à l'esprit que celle qui résulte de l'accroissement de la résistance à la paroi ; mais elle ressort bien manifestement du tracé de la parabole, et il est clair que l'on ne pourrait arriver à la représentation des phénomènes dans l'hypothèse d'un paramètre constant.

181. Jeaugeage des rivières. La formule de Prony (*b*) ou (*b'*) du n° 171 peut servir à jauger, non seulement un cours d'eau à section constante

et à pente uniforme sur toute sa longueur, mais aussi un cours d'eau quelconque, pourvu qu'on puisse trouver sur son parcours une certaine longueur, 400 mètres si c'est possible, dont la section soit constante et la pente uniforme. Un profil en travers donne la section transversale du cours d'eau et le périmètre mouillé, et divisant, la section par ce périmètre, on a le rayon moyen R; un nivellement donne la pente totale de la partie régulière du cours d'eau, et cette pente, divisée par la longueur du développement de l'axe de cette partie régulière, donne la pente I par mètre. Substituant R et I dans la formule (b) ou (b'), on en conclut la vitesse v, laquelle, multipliée par la section transversale fournie par le profil, donne la dépense. Au lieu d'appliquer les formules de Prony, il convient de recourir à celles de Darcy et Bazin, qui répondent mieux à tous les cas de la pratique (173).

Si la section du cours d'eau n'est pas tout à fait constante, ce qui arrive souvent pour les cours d'eau naturels, sur la longueur à peu près régulière considérée, on fait un certain nombre de profils en travers du cours d'eau, ce qui donne le même nombre de sections, dont on prend la moyenne en divisant leur somme par leur nombre; on prend également la moyenne des périmètres mouillés, aussi donnés par les profils, et divisant la section moyenne par le périmètre moyen, on a le rayon moyen R. On détermine ensuite la pente I, puis la vitesse moyenne v et la dépense comme dans le cas précédent.

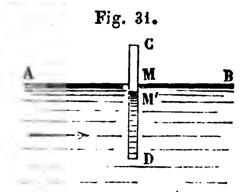
Si le profil en travers d'un cours d'eau présentait une grande profondeur sur une certaine étendue, et s'étendait loin avec une très faible profondeur, pour appliquer la formule de Prony, il conviendrait de considérer le cours d'eau comme formé de deux cours distincts, l'un correspondant à la partie profonde, et l'autre à la partie de faible profondeur; par là, chaque profil partiel serait convexe, et l'on rentrerait dans les cas qui ont servi à l'établissement de la formule de Prony.

On peut encore jauger une rivière en déterminant directement la vitesse maxima à la surface. On jette dans le fil de l'eau un flotteur cylindrique s'immergeant presque entièrement, et, à cet effet, construit en chêne seulement, ou mieux en liège avec plaque de plomb pour lest. On compte à l'aide d'une montre à secondes, ou d'un chronomètre à pointage, le temps que met le flotteur pour parcourir une certaine distance, que l'on a encore eu soin de prendre la plus grande possible et au point où le cours d'eau est le plus régulier, et divisant le chemin par le temps, on a la vitesse. On a soin de répéter une dizaine de fois l'expérience, et, en prenant la moyenne des vitesses trouvées dans toutes les expériences, on obtient une vitesse que l'on peut considérer comme étant la vitesse maximum, laquelle sert à calculer la vitesse moyenne (176, 179). On détermine ensuite la section du cours d'eau par un simple profil, si la partie parcourue par le flotteur a partout la même section, ou par un certain nombre, comme il a déjà été indiqué dans ce numéro, si la section n'est pas tout à fait constante, et la vitesse moyenne, multipliée par la section, donne la dépense. On a soin de jeter le flotteur dans le courant un peu au-dessus du point duquel on commence à compter le temps, afin

qu'arrivé à ce point, le flotteur possède la vitesse du courant. Au lieu d'un seul flotteur, on peut en jeter plusieurs à la fois dans le courant; mais il convient encore, malgré cela, de répéter un certain nombre de fois l'expérience.

182. Tube Pitot. Perfectionnements de Darcy. Anciennement, Pitot proposa le tube jaugeur qui porte son nom; mais jusqu'à l'époque où Darcy fit de ce tube un appareil vraiment pratique, la détermination de la vitesse à la surface d'un cours d'eau eut lieu à l'aide de flotteurs (181).

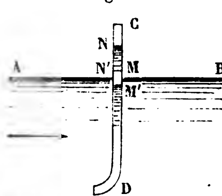
Fig. 31.



AB étant la surface d'un courant liquide, plaçant dans le courant un tube droit CD ouvert aux deux bouts, le liquide s'élève dans ce tube en un point M' inférieur d'une faible quantité MM' au niveau de la surface du courant, et la perte de charge MM', que l'on peut attribuer au dérangement des filets liquides que le tube fait subir au courant, a un rapport constant avec la hauteur $\frac{V^2}{2g}$ due à la vitesse des filets liquides en D.

Si le tube, au lieu d'être droit, est recourbé en sens contraire du courant, le liquide qui y demeure en repos s'y élève d'une quantité N'N au-dessus du niveau N' du liquide extérieur.

Fig. 32.



Pitot admettait que la hauteur N'N est égale à la hauteur due à la vitesse V du liquide en D. Mais, comme le fait remarquer Darcy, le tube courbé, en faisant dévier les filets liquides produit une perte de charge qu'on peut supposer approximativement égale à celle MM' fournie par le tube droit; on doit poser :

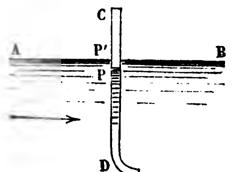
$$\frac{V^2}{2g} = N'N + MM',$$

et comme MM' est proportionnel à $\frac{V^2}{2g}$, on peut écrire, μ étant un coefficient de proportionnalité à déterminer :

$$\frac{V^2}{2g} = \mu \times N'N.$$

Pitot ayant remarqué aussi que quand on dirige le tube recourbé dans le sens du courant, ou même dans une direction perpendiculaire à celle du courant, il y a dépression dans le tube d'une quantité P'P, on peut poser, μ' étant un nouveau coefficient constant :

Fig. 33.

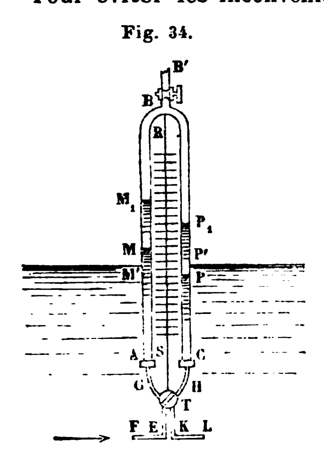


$$\frac{V^2}{2g} = \mu' \times P'P.$$

L'ancien tube de Pitot s'ouvrant en entonnoir dans le liquide, afin d'embrasser un grand nombre de filets fluides, il en résultait dans le tube des oscillations très gênantes pour la lecture des hauteurs P′P et N′N. Cette disposition avait de plus l'inconvénient de faire intervenir un grand nombre de filets dans la production des variations de hauteur, et par suite de fournir, non pas la vitesse d'un filet en particulier, mais une sorte de moyenne entre les vitesses de tous ces filets.

Pour éviter les inconvénients du tube Pitot, et obtenir un appareil exact et commode, Darcy a réuni en un seul deux tubes Pitot, dont le bas EF de l'un est dirigé en sens contraire du courant, et le bas KL de l'autre dans le sens du courant. Ainsi un tube en verre ABC, de $0^{m},01$ de diamètre, est prolongé aux points A et C par deux tubes en cuivre d'un très petit diamètre, dont l'un GEF vient déboucher contre le courant, tandis que l'autre HKL est dirigé dans le sens du courant ou s'ouvre à angle droit sur le premier. Supposons, pour la description de l'appareil, que les branches EF, KL soient dirigées en sens contraire l'une de l'autre. En B est un robinet qui permet d'ouvrir et de fermer à volonté le haut du tube en verre, et un fragment de tube B′ permet à l'observateur d'exercer une aspiration à l'intérieur du tube ABC. Une échelle graduée RS sépare les deux branches AB, BC.

Fig. 34.



On plonge l'appareil dans l'eau en l'orientant dans le sens du courant, et en ayant soin qu'il soit placé verticalement. Il est maintenu dans cette position à l'aide d'une vis, le long d'une tige de fer solidement fichée dans le lit du cours d'eau, au point où l'on veut déterminer les vitesses. Ouvrant le robinet T à l'aide d'une tige ou d'une ficelle, l'eau monte dans les deux branches du tube ABC, et s'arrête aux points M et P, situés le premier un peu au-dessus et le second un peu au-dessous du niveau M′ de l'eau dans le canal.

Posant alors :

$$\frac{V^2}{2g} = \mu \times M'M \quad \text{et} \quad \frac{V^2}{2g} = \mu' \times P'P,$$

de ces deux équations on conclut :

$$V = \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{\mu} + \frac{1}{\mu'}}} \times \sqrt{2g(M'M + P'P)} = K\sqrt{2g(M'M + P'P)}.$$

La vitesse V s'obtient donc en mesurant la somme M′M + P′P, et en

multipliant par un coefficient unique K la vitesse due à une hauteur égale à cette somme.

Pour mesurer commodément la somme M'M + P'P, on fait monter, par une simple aspiration exercée en B', les sommets des deux colonnes en une région de l'échelle où la lecture est facile. En même temps, on ferme le robinet inférieur T, pour empêcher les oscillations auxquelles les niveaux M et P sont exposés tant qu'ils communiquent librement avec les filets en mouvement.

Le faible diamètre des branches F et L permet de déterminer la vitesse propre à un filet unique. La réunion des deux tubes, celui d'amont et celui d'aval, en doublant la hauteur à mesurer, fournit une précision plus grande. Le peu d'épaisseur de la partie basse de l'appareil a pour objet de réduire à sa plus faible limite la perturbation produite par la présence de l'instrument au sein des filets liquides. Enfin l'aspiration élève d'une même quantité les sommets des colonnes et facilite des lectures qui seraient presque impossibles au niveau même de l'eau.

Le coefficient K de la formule précédente doit être déterminé pour chaque instrument par un tarage spécial. Darcy et Bazin ont eu recours à trois procédés différents pour leur instrument, dans lequel le tube ABC a $0^m,01$ de diamètre, et ceux EF et KL $0^m,0015$ seulement. Le tube KL au lieu d'être dirigé dans le sens du courant, est placé à côté du tube EF avec lequel il se raccorde de manière que leur ensemble offre le moins possible de surface au choc direct de l'eau. Le tube KL n'atteint pas jusqu'à l'extrémité de celui EF, et s'ouvre latéralement, c'est-à-dire dans une direction perpendiculaire au courant.

Les trois procédés de tarage suivis par Darcy et Bazin consistent :

1° A comparer les vitesses superficielles fournies par l'emploi de flotteurs aux vitesses déduites des indications du tube; la moyenne de 92 expériences a donné $K = 1,007$.

2° A faire mouvoir, à l'aide d'une barque, l'instrument dans une eau tranquille; la moyenne de 32 expériences ayant donné $K = 1,034$, Bazin attribue l'excès de cette valeur à la forme même de la barque employée.

3° A mesurer, à l'aide du tube, la vitesse en un grand nombre de points de la section d'un courant dont le débit est connu d'avance. On a pu comparer le débit connu avec le débit calculé d'après les vitesses accusées par l'instrument, et par suite déterminer la valeur de K; la moyenne de 31 expériences a donné $K = 0,993$.

Bazin, écartant la valeur 1,034, qui paraît exagérée, a pris pour la valeur définitive de K la moyenne entre les deux autres valeurs; ce qui donne $K = 1$ pour le coefficient applicable à son instrument, avec lequel on a alors $V = \sqrt{2g(M'M + P'P)}$.

183. Mouvement de l'eau dans un canal rectangulaire à surface lisse ou enduit en ciment de Pouilly. Les eaux de la source du Rosoir sont amenées à Dijon à l'aide d'un aqueduc en maçonnerie, voûté en plein cintre, et qui a $0^m,90$ sous clef sur $0^m,60$ de largeur. Cette largeur est réduite à $0^m,54$ par un enduit en ciment de Pouilly, qui s'élève jus-

qu'au-dessus du niveau de l'eau. Le fond est tout à fait plat (170). En amenant les eaux dans un réservoir, on a pu mesurer avec une grande exactitude les volumes $0^{mc},0874$, $0^{mc},0669$, $0^{mc},0446$ et $0^{mc},0236$ écoulés par seconde dans les diverses expériences, et à l'aide d'un flotteur, qu'on observait par des regards disposés de 100 en 100 mètres, on a pu mesurer la vitesse maximum. Des résultats obtenus, Darcy a déduit les formules suivantes, qui établissent les relations entre les vitesses, la pente et les dimensions de la section de la veine fluide :

1° $$\left(0,00025 + \frac{0,0000147}{H}\right) v^2 = \frac{LH}{L + 2H} \times I,$$

2° $$\left(0,0001751 + \frac{0,00000575}{H}\right) V^2 = \frac{LH}{L + 2H} \times I.$$

v vitesse moyenne de l'eau dans l'aqueduc;
V vitesse maximum à la surface;
I pente par mètre;
H profondeur de l'eau;
L largeur uniforme de la veine fluide.

Dans la presque totalité des cas, H a une valeur assez grande pour qu'on puisse négliger les seconds termes entre parenthèses dans les formules précédentes, qui deviennent alors :

$$0,00025v^2 = \frac{LH}{L + 2H} \times I, \quad \text{d'où} \quad v = 63,25 \sqrt{\frac{LH}{L + 2H} \times I},$$

et

$$0,0001751\,V^2 = \frac{LH}{L + 2H} \times I, \quad \text{d'où} \quad V = 75,53 \sqrt{\frac{LH}{L \quad 2H} \times I.}$$

De ces valeurs de v et V on déduit :

$$\frac{v}{V} = \frac{63,25}{75,53} = 0,8369. \qquad (176)$$

TUYAUX DE CONDUITE DES EAUX

184. Outre la formule relative à l'établissement des canaux à ciel découvert (171), de Prony, de la discussion de 51 expériences de Dubuat, Bossut et Couplet, a encore conclu une formule analogue pour le cas d'une conduite cylindrique régulière dans laquelle le régime des eaux est établi; cette formule est :

$$\frac{DJ}{4} = av + bv^2 = 0,0000173v + 0,000348v^2; \qquad (A)$$

de laquelle on tire (*Int.* 538) :

$$v = \sqrt{0,0062 + 2871,44\,\frac{DJ}{4}} - 0,025,$$

ou à peu près : $$v = 53,58 \sqrt{\frac{DJ}{4}} - 0,025.$$

v vitesse moyenne de régime;
D diamètre intérieur de la conduite;
J pente par mètre, ou différence de niveau de l'eau aux deux extrémités de la conduite divisée par la longueur totale de la conduite;
a coefficient égal à 0,0000173314 d'après de Prony, et à 0,00002236 d'après Eytelwein;
b coeficient égal à 0,0003482590 d'après de Prony, et à 0,00028032 d'après Eytelwein;

Ayant v, on a la dépense :

$$Q = Sv = \frac{\pi D^2}{4} v. \qquad \text{(B)}$$

De la discussion des résultats qui ont servi à de Prony et Eytelwein pour établir leur formule, de Saint-Venant a conclu la formule monome (Mémoire cité n° 172) :

$$\frac{DJ}{4} = 0,00029557 v^{\frac{12}{7}}, \quad \text{d'où} \quad v = 114,494 \left(\frac{DJ}{4}\right)^{\frac{7}{12}}.$$

v et D ont les mêmes significations que ci-dessus. Quant à J, il en a une un peu différente, qui avait été admise par Dubuat et ensuite par Eytelwein.

La *hauteur de charge*, dit Dubuat (*Principes d'hydraulique*), est une force motrice qui peut être considérée comme divisée en deux parties, l'une *employée à imprimer la vitesse*, l'autre à vaincre la résistance qui naît du mouvement dans toute la longueur du tuyau.

La première de ces deux parties de la charge serait $\frac{v^2}{2g}$ s'il n'y avait pas de contraction à la jonction du tuyau avec le réservoir; mais comme dans les expériences l'entrée du tuyau n'était pas évasée, Dubuat prend $\frac{v^2}{\mu^2 \times 2g}$ pour la portion surmontant la *résistance d'inertie* du fluide, portion dont la partie $\left(\frac{1}{\mu^2} - 1\right) \frac{v^2}{2g}$ est consommée à engendrer les tourbillonnements, suite inévitable de l'épanouissement rapide de la veine après sa contraction. C'est le surplus :

$$Z - \frac{v^2}{2\mu^2 g},$$

lequel, divisé par la longueur L du tuyau, donne à Dubuat la *pente fictive* J, laquelle, multipliée par le poids du fluide de l'unité de longueur du tuyau, donne la force faisant équilibre à la résistance des parois dans la même étendue.

Z pente totale ou différence de niveau de l'eau aux deux extrémités de la conduite ;

$\frac{1}{\mu^2} = 1,55$, ou environ $\mu = 0,80$, d'après des expériences de Bossut, où le tuyau était soudé à un réservoir en fer-blanc dont l'orifice devait être à vive arête ;

$\frac{1}{\mu^2} = 1,35$, ou environ $\mu = 0,86$, d'après des expériences de Dubuat, où le tuyau partait d'une caisse en bois dont l'orifice avait apparemment des arêtes un peu arrondies ou formait comme un léger évasement à l'entrée de l'eau.

C'est en adoptant la valeur de J, de Dubuat, que de Saint-Venant est parvenu, comme pour les canaux (171), à représenter le mouvement de l'eau dans les tuyaux à l'aide de la formule :

$$\frac{\pi D^2}{4} \times \frac{Z - \frac{v^2}{2\mu^2 g}}{L} = \pi D \times cv^m$$

ou :

$$\frac{DJ}{4} = cv^m = 0,00029357 v^{\frac{12}{7}}.$$

C'est afin d'abréger les calculs relatifs à la conduite des eaux, soit à ciel découvert, soit au moyen de tuyaux, que de Prony a calculé le tableau suivant. Ce tableau contient en outre les valeurs de RI données par la formule d'Eytelwein (171).

185. Tableau relatif aux canaux et aux conduites cylindriques, calculé au moyen des formules d'Eytelwein et de de Prony.

Nota important. Les résultats de ce tableau et ceux de la table du n° 187 doivent être considérés comme théoriques, et dans l'application on devra avoir égard aux coefficients résultant de l'expérience (voir n° 195).

VITESSES moyennes *v*.	VALEURS CORRESPONDANTES de RI dans les canaux.		de $\frac{1}{4}$ DJ dans les tuyaux.	VITESSES moyennes *v*.	VALEURS CORRESPONDANTES de RI dans les canaux.		de $\frac{1}{4}$ DJ dans les tuyaux.
	EYTELWEIN.	DE PRONY.	DE PRONY.		EYTELWEIN.	DE PRONY.	DE PRONY.
m.				m			
0.01	0.000 000 3	0.000 000 5	0.000 000 2	0.51	0.000 107 5	0.000 103 1	0.000 000 4
0.02	0.000 000 6	0.000 001 0	0.000 000 5	0.52	0.000 111 5	0.000 106 8	0.000 103 2
0.03	0.000 001 1	0.000 001 6	0.000 000 8	0.53	0.000 115 5	0.000 110 4	0.000 107 0
0.04	0.000 001 6	0.000 002 3	0.000 001 3	0.54	0.000 119 7	0.000 114 2	0.000 110 9
0.05	0.000 002 1	0.000 003 0	0.000 001 7	0.55	0.000 123 9	0.000 118 0	0.000 114 9
0.06	0.000 002 8	0.000 003 8	0.000 002 3	0.56	0.000 128 2	0.000 121 9	0.000 118 9
0.07	0.000 003 5	0.000 004 6	0.000 002 9	0.57	0.000 132 6	0.000 125 8	0.000 123 0
0.08	0.000 004 3	0.000 005 5	0.000 003 6	0.58	0.000 137 0	0.000 129 8	0.000 127 2
0.09	0.000 005 1	0.000 006 5	0.000 004 4	0.59	0.000 141 6	0.000 133 9	0.000 131 5
0.10	0.000 006 0	0.000 007 5	0.000 005 2	0.60	0.000 146 1	0.000 138 0	0.000 135 8
0.11	0.000 007 1	0.000 008 6	0.000 006 1	0.61	0.000 150 8	0.000 142 2	0.000 140 2
0.12	0.000 008 2	0.000 009 8	0.000 007 1	0.62	0.000 155 6	0.000 146 5	0.000 144 6
0.13	0.000 009 3	0.000 011 0	0.000 008 1	0.63	0.000 160 4	0.000 150 8	0.000 149 1
0.14	0.000 010 6	0.000 012 3	0.000 009 3	0.64	0.000 165 3	0.000 155 1	0.000 153 7
0.15	0.000 011 9	0.000 013 6	0.000 010 4	0.65	0.000 170 2	0.000 159 6	0.000 158 4
0.16	0.000 013 2	0.000 015 0	0.000 011 7	0.66	0.000 175 3	0.000 164 1	0.000 163 1
0.17	0.000 014 7	0.000 016 5	0.000 013 0	0.67	0.000 180 3	0.000 168 6	0.000 167 9
0.18	0.000 016 2	0.000 018 0	0.000 014 4	0.68	0.000 185 5	0.000 173 3	0.000 172 8
0.19	0.000 017 8	0.000 019 6	0.000 015 9	0.69	0.000 190 8	0.000 177 9	0.000 177 8
0.20	0.000 019 5	0.000 021 3	0.000 017 4	0.70	0.000 196 1	0.000 182 7	0.000 182 8
0.21	0.000 021 2	0.000 023 0	0.000 019 0	0.71	0.000 201 5	0.000 187 5	0.000 187 9
0.22	0.000 023 0	0.000 024 7	0.000 020 7	0.72	0.000 207 0	0.000 192 4	0.000 193 0
0.23	0.000 024 9	0.000 026 6	0.000 022 4	0.73	0.000 212 5	0.000 197 3	0.000 198 2
0.24	0.000 026 9	0.000 028 5	0.000 024 2	0.74	0.000 218 1	0.000 202 3	0.000 203 5
0.25	0.000 028 9	0.000 030 4	0 000 026 1	0.75	0.000 223 8	0.000 207 3	0.000 208 9
0.26	0.000 031 0	0.000 032 5	0.000 028 0	0.76	0.000 229 6	0.000 212 4	0.000 214 3
0.27	0.000 033 2	0.000 034 6	0.000 030 1	0.77	0.000 235 4	0.000 217 6	0.000 219 8
0.28	0.000 035 4	0.000 036 7	0.000 032 2	0.78	0.000 241 3	0.000 222 9	0.000 225 4
0.29	0.000 037 8	0.000 038 9	0.000 034 3	0.79	0 000 247 3	0.000 228 2	0.000 231 0
0 30	0.000 040 2	0 000 041 2	0.000 036 5	0.80	0.000 253 4	0.000 233 5	0.000 236 8
0.31	0 000 042 5	0.000 043 5	0.000 038 8	0.81	0.000 259 5	0.000 238 9	0.000 242 5
0.32	0.000 045 2	0.000 045 9	0.000 041 2	0.82	0.000 265 7	0.000 244 4	0.000 248 4
0 33	0 000 047 8	0.000 048 4	0.000 043 6	0 83	0.000 272 0	0.000 250 0	0.000 254 3
0 34	0 000 050 5	0.000 050 9	0.000 046 2	0.84	0.000 278 3	0.000 255 6	0.000 260 3
0.35	0.000 053 3	0 000 053 4	0.000 048 7	0.85	0.000 284 7	0.000 261 3	0.000 266 3
0.36	0.000 056 1	0.000 056 1	0.000 051 4	0.86	0.000 291 2	0.000 267 0	0.000 272 5
0.37	0.000 059 0	0.000 058 8	0.000 054 1	0.87	0.000 297 8	0.000 272 8	0 000 278 7
0.38	0.000 062 0	0.000 061 6	0.000 056 9	0.88	0.000 304 4	0.000 278 6	0.000 284 9
0.39	0.000 065 1	0.000 064 4	0.000 059 7	0.89	0.000 311 1	0.000 284 6	0.000 291 3
0.40	0.000 068 2	0.000 067 3	0.000 062 7	0.90	0.000 317 9	0.000 290 6	0.000 297 7
0.41	0.000 071 4	0.000 070 2	0.000 065 6	0.91	0.000 324 8	0.000 296 6	0.000 304 2
0.42	0.000 074 7	0.000 073 2	0.000 068 7	0.92	0.000 331 7	0.000 302 7	0.000 310 7
0.43	0 000 078 0	0.000 076 3	0.000 071 8	0.93	0.000 338 7	0.000 308 9	0.000 317 3
0.44	0.000 081 4	0.000 079 4	0.000 075 0	0.94	0.000 345 8	0.000 315 1	0.000 324 0
0.45	0.000 084 9	0.000 082 6	0.000 078 3	0.95	0.000 353 0	0.000 321 4	0.000 330 8
0.46	0.000 088 5	0.000 085 9	0.000 081 7	0.96	0.000 360 2	0.000 327 7	0.000 337 6
0.47	0.000 092 2	0.000 089 2	0.000 085 1	0.97	0.000 367 5	0.000 334 2	0.000 344 5
0.48	0.000 095 9	0.000 092 6	0.000 088 6	0.98	0.000 374 9	0.000 340 6	0.000 351 5
0.49	0.000 099 7	0.000 096 0	0.000 092 1	0.99	0.000 382 3	0.000 347 2	0.000 358 5
0.50	0.000 103 5	0.000 099 6	0.000 095 7	1.00	0.000 389 8	0.000 353 8	0.000 365 0

VITESSES moyennes v.	VALEURS CORRESPONDANTES de RI dans les canaux.		de $\frac{1}{4}$ DJ dans les tuyaux.	VITESSES moyennes v.	VALEURS CORRESPONDANTES de RI dans les canaux.		de $\frac{1}{4}$ DJ dans les tuyaux.
	EYTELWEIN.	DE PRONY.	DE PRONY.		EYTELWEIN.	DE PRONY.	DE PRONY.
m				m			
1.01	0.000 397 4	0.000 360 4	0.000 372 8	1.51	0.000 870 1	0.000 772 4	0.000 820 2
1.02	0.000 405 1	0.000 367 2	0.000 380 0	1.52	0.060 881 4	0.000 782 2	0.000 831 0
1.03	0.000 412 8	0.000 373 9	0.000 387 3	1.53	0.000 892 8	0.000 792 1	0.000 841 8
1.04	0.000 420 6	0.000 380 8	0.000 394 7	1.54	0.000 904 3	0.000 802 0	0.000 852 6
1.05	0.000 428 6	0.000 387 7	0.000 402 2	1.55	0.000 915 8	0.000 812 0	0.000 863 6
1.06	0.000 436 4	0.000 394 7	0.000 409 7	1.56	0.000 927 4	0.000 822 1	0.000 874 6
1.07	0.000 444 5	0.000 401 7	0.000 417 3	1.57	0.000 939 1	0.000 832 2	0.000 885 6
1.08	0.000 452 6	0.000 408 8	0.000 424 9	1.58	0.000 950 9	0.000 842 4	0.000 896 8
1.09	0.000 460 7	0.000 415 9	0.000 432 7	1.59	0.000 962 7	0.000 852 7	0.000 908 0
1.10	0.000 469 0	0.000 423 2	0.000 440 5	1.60	0.000 974 6	0.000 863 0	0.000 919 3
1.11	0.000 477 3	0.000 430 4	0.000 448 3	1.61	0.000 986 6	0.000 873 3	0.000 930 6
1.12	0.000 485 7	0.000 437 8	0.000 456 3	1.62	0.000 998 6	0.000 883 8	0.000 942 0
1.13	0.000 494 2	0.000 445 2	0.000 464 3	1.63	0.001 010 8	0.000 894 3	0.000 953 5
1.14	0.000 502 7	0.000 452 7	0.000 472 4	1.64	0.001 023 0	0.000 904 8	0.000 965 1
1.15	0.000 511 3	0.000 460 2	0.000 480 5	1.65	0.001 035 2	0.000 915 5	0.000 976 7
1.16	0.000 520 0	0.000 467 8	0.000 488 7	1.66	0.001 047 6	0.000 926 1	0.000 988 4
1.17	0.000 528 8	0.000 475 4	0.000 497 0	1.67	0.001 059 9	0.000 936 9	0.001 000 2
1.18	0.000 537 6	0.000 483 1	0.000 505 4	1.68	0.001 072 5	0.000 947 7	0.001 012 0
1.19	0.000 546 5	0.000 490 9	0.000 513 8	1.69	0.001 085 0	0.000 958 6	0.001 024 0
1.20	0.000 555 5	0.000 498 8	0.000 522 3	1.70	0.001 097 7	0.000 969 5	0.001 035 9
1.21	0.000 564 6	0.000 506 7	0.000 530 9	1.71	0.001 110 4	0.000 980 5	0.001 048 0
1.22	0.000 573 7	0.000 514 6	0.000 539 5	1.72	0.001 123 1	0.000 991 5	0.001 060 1
1.23	0.000 582 9	0.000 522 6	0.000 548 2	1.73	0.001 136 0	0.001 002 6	0.001 072 3
1.24	0.000 592 1	0.000 530 7	0.000 557 0	1.74	0.001 148 9	0.001 013 8	0.001 084 5
1.25	0.000 601 5	0.000 538 9	0.000 565 8	1.75	0.001 162 0	0.001 025 1	0.001 096 9
1.26	0.000 610 9	0.000 547 1	0.000 574 7	1.76	0.001 175 0	0.001 036 4	0.001 109 3
1.27	0.000 620 5	0.000 555 3	0.000 583 7	1.77	0.001 188 1	0.001 047 7	0.001 121 7
1.28	0.000 630 0	0.000 563 7	0.000 592 8	1.78	0.001 201 4	0.001 059 2	0.001 134 3
1.29	0.000 639 6	0.000 572 1	0.000 601 9	1.79	0.001 214 6	0.001 070 6	0.001 146 9
1.30	0.000 649 3	0.000 580 5	0.000 611 1	1.80	0.001 228 1	0.001 082 2	0.001 159 6
1.31	0.000 659 1	0.000 589 0	0.000 620 4	1.81	0.001 241 4	0.001 093 8	0.001 172 3
1.32	0.000 669 0	0.000 597 6	0.000 629 7	1.82	0.001 255 1	0.001 105 5	0.001 185 1
1.33	0.000 678 9	0.000 606 3	0.000 639 1	1.83	0.001 268 6	0.001 117 2	0.001 198 0
1.34	0.000 688 9	0.000 615 0	0.000 648 6	1.84	0.001 282 2	0.001 129 0	0.001 211 0
1.35	0.000 699 0	0.000 623 7	0.000 658 1	1.85	0.001 296 0	0.001 140 9	0.001 224 0
1.36	0.000 709 1	0.000 632 6	0.000 667 7	1.86	0.001 309 7	0.001 152 8	0.001 237 1
1.37	0.000 719 3	0.000 641 4	0.000 677 4	1.87	0.001 323 7	0.001 164 8	0.001 250 2
1.38	0.000 729 6	0.000 650 4	0.000 687 1	1.88	0.001 337 5	0.001 176 8	0.001 263 5
1.39	0.000 740 0	0.000 659 4	0.000 697 0	1.89	0.001 351 6	0.001 188 9	0.001 276 8
1.40	0.000 750 4	0.000 668 5	0.000 706 9	1.90	0.001 365 7	0.001 201 1	0.001 290 1
1.41	0.000 760 9	0.000 677 6	0.000 716 8	1.91	0.001 379 8	0.001 213 3	0.001 303 6
1.42	0.000 771 5	0.000 686 8	0.000 726 8	1.92	0.001 394 1	0.001 225 6	0.001 317 1
1.43	0.000 782 2	0.000 696 1	0.000 736 9	1.93	0.001 408 4	0.001 238 0	0.001 330 7
1.44	0.000 792 9	0.000 705 4	0.000 747 1	1.94	0.001 422 8	0.001 250 4	0.001 344 3
1.45	0.000 803 7	0.000 714 8	0.000 757 3	1.95	0.001 437 3	0.001 262 8	0.001 358 1
1.46	0.000 814 6	0.000 724 2	0.000 767 7	1.96	0.001 451 9	0.001 275 4	0.001 371 8
1.47	0.000 825 8	0.000 733 7	0.000 778 0	1.97	0.001 466 4	0.001 288 0	0.001 385 7
1.48	0.000 836 6	0.000 743 3	0.000 788 5	1.98	0.001 481 1	0.001 300 6	0.001 399 6
1.49	0.000 847 7	0.000 752 9	0.000 799 0	1.99	0.001 495 9	0.001 313 4	0.001 413 6
1.50	0.000 858 9	0.000 762 6	0.000 809 6	2.00	0.001 510 7	0.001 326 2	0.001 427 7

VITESSES moyennes v.	VALEURS CORRESPONDANTES			VITESSES moyennes v.	VALEURS CORRESPONDANTES		
	de RI dans les canaux.		de $\frac{1}{4}$ DJ dans les tuyaux.		de RI dans les canaux.		de $\frac{1}{4}$ DJ dans les tuyaux.
	EYTELWEIN.	DE PRONY.	DE PRONY.		EYTELWEIN.	DE PRONY.	DE PRONY.
m.				m.			
2.01	0.001 525 7	0.001 339 0	0.001 441 8	2.51	0.002 363 8	0.002 060 3	0.002 237 6
2.02	0.001 540 5	0.001 351 9	0.001 456 0	2.52	0.002 382 4	0.002 076 3	0.002 255 3
2.03	0.001 555 6	0.001 364 9	0.001 470 3	2.53	0.002 401 2	0.002 092 4	0.002 273 0
2.04	0.001 570 7	0.001 377 9	0.001 484 7	2.54	0.002 419 9	0.002 108 5	0.002 290 8
2.05	0.001 585 9	0.001 391 0	0.001 499 1	2.55	0.002 438 8	0.002 124 7	0.002 308 7
2.06	0.001 601 2	0.001 404 2	0.001 513 6	2.56	0.002 457 7	0.002 140 9	0.002 326 7
2.07	0.001 616 5	0.001 417 4	0.001 528 1	2.57	0.002 476 8	0.002 157 2	0.002 344 8
2.08	0.001 632 0	0.001 430 7	0.001 542 8	2.58	0.002 495 8	0.002 173 6	0.002 362 9
2.09	0.001 647 4	0.001 444 0	0.001 557 5	2.59	0.002 514 9	0.002 190 0	0.002 381 0
2.10	0.001 663 0	0.001 457 4	0.001 572 2	2.60	0.002 534 0	0.002 206 5	0.002 399 3
2.11	0.001 678 6	0.001 470 9	0.001 587 1	2.61	0.002 553 4	0.002 223 1	0.002 417 6
2.12	0.001 694 3	0.001 484 4	0.001 602 0	2.62	0.002 572 8	0.002 239 7	0.002 436 0
2.13	0.001 710 1	0.001 498 0	0.001 616 9	2.63	0.002 592 2	0.002 256 4	0.002 454 5
2.14	0.001 725 7	0.001 511 7	0.001 632 0	2.64	0.002 611 8	0.002 273 1	0.002 473 0
2.15	0.001 741 9	0.001 525 4	0.001 647 1	2.65	0.002 631 3	0.002 290 0	0.002 491 6
2.16	0.001 757 9	0.001 539 2	0.001 662 3	2.66	0.002 650 9	0.002 306 8	0.002 510 2
2.17	0.001 774 0	0.001 553 0	0.001 677 5	2.67	0.002 670 7	0.002 323 8	0.002 529 0
2.18	0.001 790 1	0.001 566 9	0.001 692 8	2.68	0.002 690 5	0.002 340 7	0.002 547 8
2.19	0.001 806 3	0.001 580 9	0.001 708 2	2.69	0.002 710 4	0.002 357 8	0.002 566 7
2.20	0.001 822 6	0.001 594 9	0.001 723 7	2.70	0.002 730 3	0.002 374 9	0.002 585 6
2.21	0.001 838 9	0.001 609 0	0.001 739 2	2.71	0.002 750 4	0.002 392 1	0.002 604 6
2.22	0.001 855 4	0.001 623 1	0.001 754 8	2.72	0.002 770 4	0.002 409 3	0.002 623 7
2.23	0.001 871 9	0.001 637 3	0.001 770 5	2.73	0.002 790 6	0.002 426 6	0.002 642 9
2.24	0.001 888 5	0.001 651 6	0.001 786 2	2.74	0.002 810 8	0.002 444 0	0.002 662 1
2.25	0.001 905 2	0.001 665 9	0.001 802 1	2.75	0.002 831 1	0.002 461 4	0.002 681 4
2.26	0.001 921 8	0.001 680 3	0.001 817 9	2.76	0.002 851 5	0.002 478 9	0.002 700 7
2.27	0.001 938 7	0.001 694 8	0.001 833 9	2.77	0.002 872 0	0.002 496 5	0.002 720 2
2.28	0.001 955 5	0.001 709 3	0.001 849 9	2.78	0.002 892 5	0.002 514 1	0.002 739 7
2.29	0.001 972 5	0.001 723 9	0.001 866 0	2.79	0.002 913 1	0.002 531 8	0.002 759 2
2.30	0.001 989 5	0.001 738 5	0.001 882 2	2.80	0.002 933 8	0.002 549 5	0.002 778 9
2.31	0.002 006 7	0.001 753 2	0.001 898 4	2.81	0.002 954 5	0.002 567 3	0.002 798 6
2.32	0.002 023 8	0.001 768 0	0.001 914 7	2.82	0.002 975 4	0.002 585 1	0.002 818 4
2.33	0.002 041 0	0.001 782 8	0.001 931 0	2.83	0.002 996 3	0.002 603 1	0.002 838 2
2.34	0.002 058 4	0.001 797 7	0.001 947 5	2.84	0.003 017 2	0.002 621 0	0.002 858 1
2.35	0.002 075 7	0.001 812 6	0.001 964 0	2.85	0.003 038 3	0.002 639 1	0.002 878 1
2.36	0.002 093 2	0.001 827 7	0.001 980 6	2.86	0.003 059 4	0.002 657 2	0.002 898 2
2.37	0.002 110 7	0.001 842 7	0.001 997 2	2.87	0.003 080 6	0.002 675 4	0.002 918 3
2.38	0.002 128 4	0.001 857 9	0.002 013 9	2.88	0.003 101 8	0.002 693 6	0.002 938 5
2.39	0.002 146 0	0.001 873 1	0.002 030 7	2.89	0.003 123 2	0.002 711 9	0.002 958 8
2.40	0.002 163 7	0.001 888 3	0.002 047 6	2.90	0.003 144 6	0.002 730 2	0.002 979 1
2.41	0.002 181 6	0.001 903 7	0.002 064 5	2.91	0.003 166 1	0.002 748 7	0.002 999 5
2.42	0.002 199 5	0.001 919 0	0.002 081 5	2.92	0.003 187 6	0.002 767 1	0.003 020 0
2.43	0.002 217 5	0.001 934 5	0.002 098 5	2.93	0.003 209 2	0.002 785 7	0.003 040 5
2.44	0.002 235 5	0.001 950 0	0.002 115 7	2.94	0.003 230 9	0.002 804 3	0.003 061 2
2.45	0.002 253 6	0.001 965 6	0.002 132 9	2.95	0.003 252 7	0.002 822 9	0.003 081 9
2.46	0.002 271 8	0.001 981 2	0.002 150 2	2.96	0.003 274 5	0.002 841 7	0.003 102 6
2.47	0.002 290 0	0.001 986 9	0.002 167 5	2.97	0.003 296 5	0.002 860 5	0.003 123 4
2.48	0.002 308 4	0.002 012 6	0.002 184 9	2.98	0.003 318 5	0.002 879 3	0.003 144 3
2.49	0.002 326 8	0.002 028 5	0.002 202 4	2.99	0.003 340 5	0.002 898 2	0.003 165 3
2.50	0.002 345 3	0.002 044 3	0.002 219 9	3.00	0.003 362 7	0.002 917 2	0.003 186 3

186. Limites convenables de la vitesse dans les tuyaux de conduite. A moins qu'on ne possède naturellement une charge motrice considérable, il ne convient pas que la vitesse v dépasse 3 mètres et même 2 mètres, surtout si les robinets sont susceptibles d'interrompre brusquement la circulation; les coups de bélier qui en résulteraient pourraient briser la conduite ou au moins altérer les joints. Quand il y a intérêt à économiser la charge, on limite v à quelques centimètres pour les petits diamètres et à quelques décimètres pour les grands; cependant, lorsque les eaux peuvent laisser des dépôts qui obstrueraient les conduites, v ne doit pas être inférieure à 1 ou 2 décimètres, et elle doit toujours être suffisante pour que la vase et le sable léger en suspension ne se déposent pas (176).

L'application suivante va faire comprendre la marche à suivre dans l'établissement des tuyaux de conduite d'eau, en faisant usage de la table de Prony (185), marche qui serait analogue pour l'établissement des canaux découverts.

Soit à déterminer le diamètre d'une conduite de 5000 mètres de longueur, capable de débiter 60 mètres cubes d'eau par heure, la charge totale, c'est-à-dire la différence de niveau de l'eau dans le réservoir alimentaire et dans le réservoir alimenté étant de 5 mètres.

La dépense par seconde est de $\frac{60\,000}{3600} = 16^{\text{lit}},6667$.

La charge J (185) par mètre est de $\frac{5}{5000} = 0^{\text{m}},001$.

Cela posé, on procède pas tâtonnement, en essayant différents diamètres :

Pour une conduite de $0^{\text{m}},20$ de diamètre, on a :

$$\frac{1}{4}\,\text{DJ} = \frac{0,20 \times 0,001}{5} = 0,00005. \qquad (185)$$

Cherchant dans la table la valeur de $\frac{1}{4}$ DJ qui approche le plus de la valeur 0,00005 sans la surpasser, on trouve 0,0000487, qui correspond à la vitesse moyenne $0^{\text{m}},35$ par seconde.

La section de la conduite de $0^{\text{m}},20$ de diamètre étant de 3,1416 décimètres carrés, le débit par seconde est de :

$$3,1416 \times 3,5 = 10^{\text{lit}},9956\,;$$

le diamètre 0,20 est donc trop faible.

Essayant un diamètre plus grand, $0^{\text{m}},24$ par exemple, on a :

$$\frac{1}{4}\,\text{DJ} = \frac{0,24 \times 0,001}{4} = 0,00006,$$

et la table donne pour la valeur de $\frac{1}{4}$ DJ immédiatement inférieure à 0,00006, celle de 0,0000597 qui correspond à la vitesse moyenne $0^{\text{m}},39$.

La section du tuyau étant de $4^{dmc},5239$, le débit par seconde est de :

$$4,5239 \times 3,9 = 17^{lit},6432.$$

Le diamètre $0^m,24$ est donc un peu fort; mais, à cause des dépôts séléniteux et vaseux qui se forment dans les tuyaux de conduite, et qui en diminuent la section et par suite le débit, il convient d'adopter $0^m,24$. Du reste, on déterminera plus rapidement le diamètre devant satisfaire à la formule (A) de de Prony (184) en se reportant à la table du n° 187 que nous avons calculée pour éviter les tâtonnements précédents et qui donne, pour différents diamètres, les dépenses et les charges par mètre de longueur de conduite correspondant à différentes vitesses moyennes de l'eau dans chaque conduite. Les diamètres compris dans cette table sont tels, que chacun d'eux diffère assez peu de ceux immédiatement inférieur et supérieur, pour que le débit à produire sous une certaine charge tombant entre les débits des deux diamètres de la table, sous la même charge, on puisse interpoler facilement.

Lorsqu'on établit une distribution d'eau dans une ville, il convient de ne pas avoir un trop grand nombre de diamètres différents pour les divers embranchements de la conduite, afin de diminuer, autant que possible, les frais de modèles; mais il faut avoir soin aussi de ne pas pécher en sens contraire, c'est-à-dire de ne pas employer des diamètres trop grands pour les débits à produire; car bientôt l'excès de matière contenue dans les tuyaux et l'augmentation du prix des robinets dépasseraient l'économie faite sur les modèles.

Une considération à laquelle il convient d'avoir égard en fixant le débit d'une conduite et par suite son diamètre, c'est de savoir si ce débit est susceptible de devoir être augmenté, par suite d'un accroissement de la population ou de la construction de quelques établissements industriels.

187. Table (*calculée d'après la formule de de Prony du n° 184*) **relative à l'établissement des conduites d'eau de $0^m,05$ à $0^m,60$.** Cette table est limitée au diamètre de $0^m,60$; mais au moyen d'une proportionnalité très simple, elle est applicable à un diamètre aussi grand qu'on voudra. (Voir n° 194.)

La première colonne de notre table est commune à tous les diamètres qui se trouvent sur la page, et elle donne les différentes vitesses moyennes de l'eau dans les conduites. La deuxième contient les dépenses correspondant aux vitesses de la première colonne; ces dépenses ont été obtenues en multipliant la section de chaque tuyau par les vitesses moyennes. La troisième renferme les charges J par mètre de longueur de conduite (184), nécessaires pour que les débits soient ceux indiqués dans la deuxième colonne; ces charges ont été déduites de la table de Prony (185), en divisant par $\frac{1}{4}$ D les valeurs de $\frac{1}{4}$ DJ correspondant aux vitesses moyennes de la première colonne de notre table.

TABLE relative à l'établissement des tuyaux de conduite d'eau.

VITESSES moyennes.	Diamèt. de la conduite 0m.05 Section id. 0mc.0019635		Diamèt. de la conduite 0m.06 Section id. 0mc.00282744		Diamèt. de la conduite 0m.07 Section id. 0mc.00384846	
	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.
m.	l.	m.	l.	m	l.	m.
0.005	0.0098	0.000 007 62	0.0141	0.000 006 35	0.0192	0.000 005 44
0.01	0.0196	0.000 016 66	0.0283	0.000 013 88	0.0385	0.000 011 90
0.02	0.0393	0.000 038 88	0.0565	0.000 032 40	0.0770	0.000 027 77
0.03	0.0589	0.000 066 68	0.0848	0.000 055 57	0.1155	0.000 047 63
0.04	0.0785	0.000 100 04	0.1131	0.000 083 37	0.1539	0.000 071 46
0.05	0.0982	0.000 138 98	0.1414	0.000 115 82	0.1924	0.000 099 27
0.06	0.1178	0.000 183 48	0.1696	0.000 152 90	0.2309	0.000 131 06
0.07	0.1374	0.000 233 58	0.1979	0.000 194 65	0.2694	0.000 166 84
0.08	0.1571	0.000 289 22	0.2262	0.000 241 02	0.3079	0.000 206 59
0.09	0 1767	0.000 350 46	0.2545	0.000 292 05	0.3464	0.000 250 33
0.10	0.1963	0.000 417 26	0.2827	0.000 347 72	0.3848	0.000 298 04
0.11	0.2160	0.000 489 64	0.3110	0.000 408 03	0.4233	0.000 349 74
0.12	0.2356	0.000 567 58	0.3393	0.000 472 98	0.4618	0.000 405 41
0.13	0.2552	0.000 651 10	0.3676	0.000 542 58	0.5003	0.000 465 07
0.14	0.2749	0.000 740 18	0.3958	0.000 616 82	0.5388	0.000 528 70
0.15	0.2945	0.000 834 84	0.4241	0.000 695 70	0.5773	0.000 596 31
0.16	0.3142	0.000 935 08	0.4524	0.000 779 23	0.6158	0.000 667 91
0.17	0.3338	0.001 040 88	0.4807	0.000 867 40	0.6542	0.000 743 49
0.18	0.3534	0.001 152 26	0.5089	0.000 960 22	0.6927	0.000 823 04
0.19	0.3731	0.001 269 20	0 5372	0.001 057 67	0.7312	0.000 906 57
0.20	0.3927	0.001 391 74	0.5655	0.001 159 78	0.7697	0.000 994 10
0.22	0.4320	0.001 653 50	0.6220	0.001 377 92	0.8467	0.001 181 07
0.25	0,4909	0.002 087 92	0.7069	0.001 739 93	0.9621	0.001 491 37
0.28	0.5498	0.002 572 50	0.7917	0.002 143 75	1.0775	0.001 837 50
0.30	0.5890	0.002 923 42	0.8482	0.002 436 18	1.1545	0.002 088 16
0.32	0.6283	0.003 296 62	0.9048	0.002 747 18	1.2315	0.002 354 73
0.35	0.6872	0.003 898 22	0.9896	0.003 248 52	1.3470	0.002 784 44
0.38	0.7461	0.004 549 96	1.0744	0.003 791 63	1.4624	0.003 249 97
0.40	0.7854	0.005 012 32	1.1310	0.004 176 93	1.5394	0.003 580 23
0.42	0.8247	0.005 496 96	1.1875	0.004 580 80	1.6164	0.003 926 40
0.45	0.8836	0.006 265 72	1.2723	0.005 221 43	1.7318	0.004 475 51
0.48	0.9425	0.007 084 64	1.3572	0.005 903 87	1.8473	0.005 060 46
0.50	0.9817	0.007 658 44	1.4137	0.006 382 03	1.9242	0.005 470 31
0.55	1.0799	0.009 190 44	1.5551	0.007 658 70	2.1166	0.006 564 60
0.60	1.1781	0.010 861 76	1.6965	0.009 051 47	2.3091	0.007 758 40
0.65	1.2763	0.012 672 38	1.8378	0.010 560 32	2.5015	0.009 051 70
0.70	1.3744	0.014 622 32	1.9792	0.012 185 27	2.6939	0.010 444 51
0.75	1.4726	0.016 711 54	2.1206	0.013 926 28	2.8863	0.011 936 81
0.80	1.5708	0.018 940 08	2.2619	0.015 783 40	3.0788	0.013 528 63
0.85	1.6690	0.021 307 90	2.4033	0.017 756 58	3.2712	0.015 219 93
0.90	1.7671	0.023 815 04	2.5447	0.019 845 87	3.4636	0.017 010 74

VITESSES moyennes.	Diamèt. de la conduite 0m.05 Section *id.* 0mc.0019635		Diamèt. de la conduite 0m.06 Section *id.* 0mc.00282744		Diamèt. de la conduite 0m.07 Section *id.* 0mc.00384846	
	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.
m.	l.	m.	l.	m.	l.	m.
0.95	1.8653	0.026 461 48	2.6861	0.022 051 23	3.6560	0.018 901 06
1.00	1.9635	0.029 247 24	2.8274	0.024 372 70	3.8484	0.020 890 89
1.05	2.0617	0.032 172 28	2.9688	0.026 810 23	4.0409	0.022 980 20
1.10	2.1598	0.035 236 64	3.1102	0.029 363 87	4.2333	0.025 169 03
1.15	2.2580	0.038 440 30	3.2516	0.032 033 58	4.4257	0.027 457 36
1.20	2.3562	0.041 783 26	3.3929	0.034 819 38	4.6181	0.029 845 19
1.25	2.4544	0.045 265 52	3.5343	0.037 721 27	4.8105	0.032 332 51
1.30	2.5525	0.048 887 08	3.6757	0.040 739 23	5.0030	0.034 919 34
1.35	2.6507	0.052 647 96	3.8170	0.043 873 30	5.1954	0.037 605 69
1.40	2.7489	0.056 548 12	3.9584	0.047 123 43	5.3878	0.040 391 51
1.45	2.8471	0.060 587 60	4.0998	0.050 489 67	5.5803	0.043 276 86
1.50	2.9452	0.064 766 38	4.2412	0.053 971 98	5.7727	0.046 261 70
1.55	3.0434	0.069 084 48	4.3825	0.057 570 40	5.9651	0.049 346 06
1.60	3.1416	0.073 541 86	4.5239	0.061 284 88	6.1575	0.052 529 90
1.65	3.2397	0.078 138 56	4.6653	0.065 115 47	6.3499	0.055 813 26
1.70	3.3379	0.082 874 56	4.8066	0.069 062 13	6.5424	0.059 196 11
1.75	3.4361	0.087 749 86	4.9480	0.073 124 88	6.7348	0.062 678 47
1.80	3.5343	0.092 764 46	5.0894	0.077 303 72	6.9272	0.066 260 33
1.85	3.6324	0.097 918 36	5.2308	0.081 598 63	7.1196	0.069 941 69
1.90	3.7306	0.103 211 58	5.3721	0.086 009 65	7.3120	0.073 722 56
1.95	3.8288	0.108 644 08	5.5135	0.090 536 73	7.5045	0.077 602 91
2.00	3.9270	0.114 215 90	5.6549	0.095 179 92	7.6969	0.081 582 79
2.05	4.0251	0.119 927 02	5.7963	0.099 939 18	7.8893	0.085 662 16
2.10	4.1233	0.125 777 46	5.9376	0.104 814 55	8 0817	0.089 841 04
2.15	4.2215	0.131 767 18	6.0790	0.109 805 98	8.2741	0.094 119 41
2.20	4.3197	0.137 896 22	6.2204	0.114 913 52	8.4666	0.098 497 30
2.25	4.4179	0.144 164 54	6.3617	0.120 137 12	8.6590	0.102 974 67
2.30	4.5160	0.150 572 18	6.5031	0.125 476 82	8.8514	0.107 551 56
2.35	4.6142	0.157 119 12	6.6445	0.130 932 60	9.0438	0.112 227 94
2.40	4.7124	0.163 805 38	6.7859	0.136 504 48	9.2362	0.117 003 84
2.45	4.8106	0.170 630 92	6 9272	0.142 192 43	9.4287	0.121 879 23
2.50	4.9087	0.177 595 78	7.0686	0 147 996 48	9.6211	0.126 854 13
2 55	5.0070	0.184 699 94	7.2100	0.153 916 62	9.8135	0.131 928 53
2.60	5.1051	0.191 943 40	7.3513	0.159 952 83	10.0060	0.137 102 43
2.65	5.2032	0.199 326 16	7.4927	0.166 105 13	10.1984	0.142 375 83
2.70	5.3014	0.206 848 24	7.6341	0.172 373 53	10.3908	0.147 748 74
2.75	5.3996	0.214 509 60	7.7755	0.178 758 00	10.5832	0.153 221 14
2.80	5.4978	0.222 310 28	7.9168	0.185 258 57	10.7757	0.158 793 06
2.85	5.5960	0 230 250 26	8 0582	0.191 875 22	10.9681	0.164 464 47
2.90	5.6942	0.238 329 56	8.1996	0.198 607 97	11.1605	0.170 235 40
2.95	5.7923	0.246 548 14	8.3409	0.205 456 78	11.3529	0.176 105 81
3.00	5.8905	0.254 906 04	8.4823	0.212 421 70	11.5454	0.182 075 74

VITESSES moyennes.	Diamèt. de la conduite 0m.08 Section *id.* 0mc.00502656		Diamèt. de la conduite 0m.09 Section *id.* 0mc.00636174		Diamèt. de la conduite 0m.10 Section *id.* 0mc.007854	
	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.
m.	l.	m.	l	m.	l.	m.
0.005	0.0251	0.000 004 76	0.0318	0.000 004 23	0.0393	0.000 003 81
0.01	0 0503	0.000 010 41	0.0636	0.000 009 26	0.0785	0.000 008 33
0.02	0.1005	0.000 024 30	0.1272	0.000 021 60	0.1571	0.000 019 44
0.03	0.1508	0.000 041 68	0.1908	0.000 037 05	0.2356	0.000 033 34
0.04	0.2011	0.000 062 53	0.2545	0.000 055 58	0.3142	0.000 050 02
0.05	0.2513	0.000 086 86	0.3181	0.000 077 21	0.3927	0.000 069 49
0.06	0.3016	0.000 114 68	0.3817	0.000 101 93	0.4712	0.000 091 74
0.07	0.3519	0.000 145 99	0.4453	0.000 129 77	0.5498	0.000 116 79
0.08	0.4021	0.000 180 76	0.5089	0.000 160 68	0.6283	0.000 144 61
0.09	0.4524	0.000 219 04	0.5726	0.000 194 70	0.7069	0.000 175 23
0.10	0.5027	0.000 260 79	0.6362	0.000 231 81	0.7854	0.000 208 63
0.11	0.5529	0.000 306 03	0.6998	0.000 272 02	0.8639	0.000 244 82
0.12	0.6032	0.000 354 74	0.7634	0 000 315 32	0.9425	0.000 283 79
0.13	0.6535	0.000 406 94	0.8270	0.000 361 72	1.0210	0.000 325 55
0.14	0.7037	0.000 462 61	0.8906	0.000 411 21	1.0996	0.000 370 09
0.15	0.7540	0.000 521 78	0.9543	0.000 463 80	1.1781	0.000 417 42
0.16	0.8042	0.000 584 43	1.0179	0.000 519 49	1.2566	0.000 467 54
0.17	0.8545	0.000 650 55	1.0815	0.000 578 27	1.3352	0.000 520 44
0.18	0.9048	0.000 720 16	1.1451	0.000 640 15	1.4137	0.000 576 13
0.19	0.9550	0.000 793 25	1.2087	0.000 705 11	1.4923	0.000 634 60
0.20	1.0053	0.000 869 84	1.2723	0.000 773 19	1.5708	0.000 695 87
0.22	1.1058	0.001 033 44	1.3996	0.000 918 61	1.7278	0.000 826 75
0.25	1.2566	0.001 304 95	1.5904	0.001 159 96	1.9635	0.001 043 96
0.28	1.4074	0.001 607 81	1.7813	0.001 429 17	2.1992	0.001 286 25
0.30	1.5080	0.001 827 14	1.9085	0.001 624 12	2.3562	0.001 461 71
0.32	1.6085	0.002 060 39	2.0357	0.001 831 46	2.5132	0.001 648 31
0.35	1.7593	0.002 436 39	2.2266	0.002 165 68	2.7489	0.001 949 11
0.38	1.9100	0.002 843 73	2.4175	0.002 527 76	2.9846	0.002 274 98
0.40	2.0106	0.003 132 70	2.5447	0.002 784 62	3.1416	0.002 506 16
0.42	2.1111	0.003 435 60	2.6719	0.003 053 87	3.2986	0.002 748 48
0.45	2.2620	0.003 916 08	2.8628	0.003 480 96	3.5343	0.003 132 86
0.48	2.4127	0.004 427 90	3.0536	0.003 935 91	3.7700	0.003 542 32
0.50	2.5133	0.004 786 53	3.1809	0.004 254 69	3.9270	0.003 829 22
0.55	2.7646	0.005 744 03	3.4989	0.005 105 80	4.3197	0.004 595 22
0.60	3.0159	0.006 788 60	3.8170	0.006 034 31	4.7124	0.005 430 88
0.65	3.2672	0.007 920 24	4.1351	0.007 040 21	5.1051	0.006 336 19
0.70	3.5186	0.009 138 95	4.4532	0.008 123 51	5.4978	0.007 311 16
0.75	3.7699	0.010 444 71	4.7713	0.009 284 19	5.8905	0.008 355 77
0.80	4.0212	0.011 837 55	5.0894	0.010 522 27	6.2832	0.009 470 04
0.85	4.2726	0 013 317 44	5.4075	0.011 837 72	6.6759	0.010 653 95
0.90	4.5239	0.014 884 40	5.7255	0.013 230 58	7.0686	0.011 907 52

VITESSES moyennes.	Diamèt. de la conduite 0m,08 Section id. 0mc,00502656		Diamèt. de la conduite 0m,09 Section id. 0mc,00636174		Diamèt. de la conduite 0m,10 Section id. 0mc,007854	
	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.
m.	l.	m.	l.	m.	l.	m.
0.95	4.7752	0.016 538 43	6.0436	0.014 700 82	7.4613	0.013 230 74
1.00	5.0266	0.018 279 53	6.3617	0.016 248 47	7.8540	0.014 623 62
1.05	5.2779	0.020 107 68	6.6798	0.017 873 49	8.2467	0.016 086 14
1.10	5.5292	0.022 022 90	6.9979	0.019 575 91	8.6394	0.017 618 32
1.15	5.7805	0.024 025 19	7.3160	0.021 355 72	9.0321	0.019 220 15
1.20	6.0319	0.026 114 54	7.6341	0.023 212 92	9.4248	0.020 891 63
1.25	6.2832	0.028 290 95	7.9522	0.025 147 51	9.8175	0.022 632 76
1.30	6.5345	0.030 554 43	8.2702	0.027 159 49	10.2102	0.024 443 54
1.35	6.7858	0.032 904 98	8.5883	0.029 248 87	10.6029	0.026 323 98
1.40	7.0372	0.035 342 58	8.9064	0.031 415 62	10.9956	0.028 274 06
1.45	7.2885	0.037 867 25	9.2245	0.033 659 78	11.3883	0.030 293 80
1.50	7.5398	0.040 478 99	9.5426	0.035 981 32	11.7810	0.032 383 19
1.55	7.7911	0.043 177 80	9.8607	0.038 380 27	12.1737	0.034 542 24
1.60	8.0425	0.045 963 66	10.1788	0.040 856 59	12.5664	0.036 770 93
1.65	8.2937	0.048 836 60	10.4968	0.043 410 31	12.9591	0.039 069 28
1.70	8.5451	0.051 796 60	10.8149	0.046 041 42	13.3518	0.041 437 28
1.75	8.7965	0.054 843 66	11.1330	0.048 749 92	13.7445	0.043 874 93
1.80	9.0478	0.057 977 79	11.4511	0.051 535 81	14.1372	0.046 382 23
1.85	9.2991	0.061 198 98	11.7692	0.054 399 09	14.5299	0.048 959 18
1.90	9.5505	0.064 507 24	12.0873	0.057 339 77	14.9226	0.051 605 79
1.95	9.8018	0.067 902 55	12.4053	0.060 357 82	15.3153	0.054 322 04
2.00	10.0531	0.071 384 94	12.7234	0.063 453 28	15.7081	0.057 107 95
2.05	10.3044	0.074 954 39	13.0415	0.066 626 12	16.1007	0.059 963 51
2.10	10.5558	0.078 610 91	13.3596	0.069 876 37	16.4934	0.062 888 73
2.15	10.8071	0.082 354 49	13.6777	0.073 203 99	16.8861	0.065 883 59
2.20	11.0584	0.086 185 14	13.9958	0.076 609 01	17.2788	0.068 948 11
2.25	11.3097	0.090 102 84	14.3139	0.080 091 41	17.6715	0.072 082 27
2.30	11.5610	0.094 107 61	14.6320	0.083 651 21	18.0642	0.075 286 09
2.35	11.8124	0.098 199 45	14.9501	0.087 288 40	18.4569	0.078 559 56
2.40	12.0637	0.102 378 36	15.2682	0.091 002 99	18.8496	0.081 902 69
2.45	12.3150	0.106 644 33	15.5862	0.094 794 96	19.2423	0.085 315 46
2.50	12.5664	0.110 997 36	15.9043	0.098 664 32	19.6350	0.088 797 89
2.55	12.8177	0.115 437 46	16.2224	0.102 611 08	20.0277	0.092 349 97
2.60	13.0690	0.119 964 63	16.5405	0.106 635 22	20.4204	0.095 971 70
2.65	13.3203	0.124 578 85	16.8586	0.110 736 76	20.8131	0.099 663 08
2.70	13.5717	0.129 280 15	17.1766	0.114 915 69	21.2058	0.103 424 12
2.75	13.8230	0.134 068 50	17.4947	0.119 172 00	21.5985	0.107 254 80
2.80	14.0743	0.138 943 93	17.8128	0.123 505 71	21.9912	0.111 155 14
2.85	14.3256	0.143 906 41	18.1309	0.127 916 81	22.3839	0.115 125 13
2.90	14.5770	0.148 955 98	18.4490	0.132 405 31	22.7766	0.119 164 78
2.95	14.8283	0.154 092 59	18.7671	0.136 971 19	23.1693	0.123 274 07
3.00	15.0797	0.159 316 28	19.0852	0.141 614 47	23.5620	0.127 453 02

VITESSES moyennes.	Diamèt. de la conduite 0m.11 Section *id.* 0mc.00950334		Diamèt. de la conduite 0m.12 Section *id.* 0mc.01130976		Diamèt. de la conduite 0m.14 Section *id.* 0mc.01539384	
	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite
m.	l.	m.	l.	m.	l.	m.
0.01	0.0950	0.000 007 57	0.1131	0.000 006 94	0.1539	0.000 005 95
0.02	0.1901	0.000 017 67	0.2262	0.000 016 20	0.3079	0.000 013 89
0.03	0.2851	0.000 030 31	0.3393	0.000 027 79	0.4618	0.000 023 82
0.04	0.3801	0.000 045 47	0.4524	0.000 041 69	0.6158	0.000 035 73
0.05	0.4752	0.000 063 17	0.5655	0.000 057 91	0.7697	0.000 049 64
0.06	0.5702	0.000 083 40	0.6786	0.000 076 45	0.9236	0 000 065 53
0.07	0.6652	0.000 106 17	0.7917	0.000 097 33	1.0776	0.000 083 42
0.08	0.7603	0.000 131 46	0.9048	0.000 120 51	1.2315	0.000 103 30
0.09	0.8553	0.000 159 30	1.0179	0.000 146 03	1.3854	0.000 125 17
0.10	0.9503	0.000 189 66	1.1310	0.000 173 86	1.5394	0.000 149 02
0.11	1.0454	0.000 222 56	1.2441	0.000 204 02	1 6933	0.000 174 87
0.12	1.1404	0.000 257 99	1.3572	0.000 236 49	1.8473	0.000 202 71
0.13	1.2354	0.000 295 95	1.4703	0.000 271 29	2.0012	0.000 232 54
0.14	1.3305	0.000 336 45	1.5834	0.000 308 41	2.1551	0.000 264 35
0.15	1.4255	0.000 379 47	1.6965	0.000 347 85	2.3091	0.000 298 16
0.16	1.5205	0.000 425 04	1.8096	0.000 389 61	2.4630	0.000 333 96
0.17	1.6156	0.000 473 13	1.9227	0.000 433 70	2.6169	0.000 371 75
0.18	1.7106	0.000 523 75	2.0358	0.000 480 11	2.7709	0.000 411 52
0.19	1.8056	0.000 576 91	2.1489	0.000 528 84	2.9248	0.000 453 28
0.20	1.9007	0.000 632 61	2.2620	0.000 579 89	3.0788	0.000 497 15
0.22	2.0907	0.000 751 59	2.4881	0.000 688 96	3.3866	0.000 590 54
0.25	2.3758	0.000 949 05	2.8274	0.000 869 97	3.8485	0.000 745 69
0.28	2.6609	0.001 169 32	3.1667	0.001 071 88	4.3103	0.000 918 75
0.30	2.8510	0.001 328 83	3.3929	0.001 218 09	4.6182	0.001 044 08
0.32	3.0411	0.001 498 46	3.6191	0.001 373 59	4.9260	0.001 177 37
0.35	3.3262	0.001 771 92	3.9584	0.001 624 26	5.3878	0.001 392 22
0.38	3.6113	0.002 068 16	4.2977	0.001 895 82	5.8497	0.001 624 99
0.40	3.8013	0.002 278 33	4.5239	0.002 088 47	6.1575	0.001 790 12
0.42	3.9914	0.002 498 62	4.7501	0.002 290 40	6.4654	0.001 963 20
0.45	4.2765	0.002 848 05	5.0894	0 002 610 72	6.9272	0.002 237 76
0.48	4.5616	0.003 220 29	5.4287	0.002 951 94	7.3890	0.002 530 23
0.50	4.7517	0.003 481 11	5.6549	0.003 191 02	7.6969	0.002 735 16
0.55	5.2268	0.004 177 47	6.2204	0.003 829 35	8.4666	0.003 282 30
0.60	5.7020	0.004 937 16	6.7859	0.004 525 74	9.2363	0.003 879 20
0.65	6.1772	0.005 760 17	7.3513	0.005 280 16	10.0060	0.004 525 85
0.70	6.6523	0.006 646 51	7.9168	0.006 092 64	10.7757	0.005 222 26
0.75	7.1275	0.007 596 15	8.4823	0.006 963 14	11.5454	0.005 968 41
0.80	7.6027	0.008 609 13	9.0478	0.007 891 70	12.3151	0.006 764 32
0.85	8.0778	0.009 685 41	9.6133	0.008 878 29	13.0848	0.007 609 97
0.90	8.5530	0.010 825 02	10.1788	0.009 922 93	13.8545	0.008 505 37
0.95	9.0282	0.012 027 95	10.7443	0.011 025 62	14.6242	0.009 450 53

VITESSES moyennes.	Diamèt. de la conduite $0^m.11$ Section *id.* $0^{mc}.00950334$ Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Diamèt. de la conduite $0^m.12$ Section *id.* $0^{mc}.01130976$ Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Diamèt. de la conduite $0^m.14$ Section *id.* $0^{mc}.01539384$ Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.
m.	l.	m.	l.	m.	l.	m.
1.00	9.5033	0.013 294 20	11.3098	0.012 186 35	15.3938	0.010 445 45
1.05	9.9785	0.014 623 76	11.8753	0.013 405 12	16.1635	0.011 490 10
1.10	10.4537	0.016 016 65	12.4407	0.014 681 94	16.9332	0.012 584 52
1.15	10.9288	0.017 472 86	13.0062	0.016 016 79	17.7029	0.013 728 68
1.20	11.4040	0.018 992 39	13.5717	0.017 409 69	18.4726	0.014 922 59
1.25	11.8792	0.020 575 24	14.1372	0.018 860 64	19.2423	0.016 166 26
1.30	12.3543	0.022 221 40	14.7027	0.020 369 62	20.0120	0.017 459 67
1.35	12.8295	0.023 930 89	15.2682	0.021 936 65	20.7817	0.018 802 85
1.40	13.3047	0.025 703 69	15.8337	0.023 561 72	21.5514	0.020 195 76
1.45	13.7798	0.027 539 82	16.3992	0.025 244 84	22.3211	0.021 638 43
1.50	14.2550	0.029 439 26	16.9646	0.026 985 99	23.0908	0.023 130 85
1.55	14.7302	0.031 402 04	17.5301	0.028 785 20	23.8604	0.024 673 03
1.60	15.2053	0.033 428 12	18.0956	0.030 642 44	24.6301	0.026 264 95
1.65	15.6805	0.035 517 53	18.6611	0.032 557 74	25.3998	0.027 906 63
1.70	16.1557	0.037 670 25	19.2266	0.034 531 07	26.1695	0.029 598 06
1.75	16.6308	0.039 886 30	19.7921	0.036 562 44	26.9392	0.031 339 24
1.80	17.1060	0.042 165 66	20.3576	0.038 651 86	27.7089	0.033 130 17
1.85	17.5812	0.044 508 35	20.9231	0.040 799 32	28.4786	0.034 970 85
1.90	18.0563	0.046 914 35	21.4885	0.043 004 83	29.2483	0.036 861 28
1.95	18.5315	0.049 383 67	22.0540	0.045 268 37	30.0180	0.038 801 46
2.00	19.0067	0.051 916 32	22.6195	0.047 589 96	30.7877	0.040 791 40
2.05	19.4818	0.054 512 28	23.1850	0.049 969 59	31.5574	0.042 831 08
2.10	19.9570	0.057 171 57	23.7505	0.052 407 28	32.3271	0.044 920 52
2.15	20.4322	0.059 894 17	24.3160	0.054 902 99	33.0968	0.047 059 71
2.20	20.9073	0.062 680 10	24.8815	0.057 456 76	33.8664	0.049 248 65
2.25	21.3825	0.065 529 34	25.4470	0.060 068 56	34.6361	0.051 487 34
2.30	21.8577	0.068 441 90	26.0124	0.062 738 41	35.4058	0.053 775 78
2.35	22.3328	0.071 417 78	26.5779	0.065 466 30	36.1755	0.056 113 97
2.40	22.8080	0.074 456 99	27.1434	0.068 252 24	36.9452	0.058 501 92
2.45	23.2832	0.077 559 51	27.7089	0.071 096 22	37.7149	0.060 939 62
2.50	23.7583	0.080 725 35	28.2744	0.073 998 24	38.4846	0.063 427 07
2 55	24.2335	0.083 954 52	28.8399	0.076 958 31	39.2543	0.065 964 27
2.60	24.7087	0.087 247 00	29.4054	0.079 976 42	40.0240	0.068 551 22
2.65	25.1839	0.090 602 80	29.9709	0.083 052 57	40.7937	0.071 187 92
2.70	25.6590	0.094 021 93	30.5364	0.086 186 77	41.5634	0.073 874 37
2.75	26.1342	0.097 504 36	31.1018	0.089 379 00	42.3331	0.076 610 57
2.80	26.6094	0.101 050 13	31.6673	0.092 629 29	43.1027	0.079 396 53
2.85	27.0845	0.104 659 21	32.2328	0.095 937 61	43.8724	0.082 232 24
2.90	27.5597	0 108 331 62	32.7983	0.099 303 99	44.6421	0.085 117 70
2.95	28.0349	0.112 067 34	33.3638	0.102 728 39	45.4118	0.088 052 91
3.00	28.5100	0.115 866 38	33.9293	0.106 210 85	46.1815	0.091 037 87

VITESSES moyennes.	Diamèt. de la conduite 0m.15 Section *id.* 0mc.0176715		Diamèt. de la conduite 0m.16 Section *id.* 0mc.02010624		Diamèt. de la conduite 0m.18 Section *id.* 0mc.02544696	
	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.
m.	l.	m.	l.	m.	l.	m.
0.01	0.1767	0.000 005 55	0.2011	0.000 005 21	0.2545	0.000 004 63
0.02	0.3534	0.000 012 96	0.4021	0.000 012 15	0.5089	0.000 010 80
0.03	0.5301	0.000 022 23	0.6032	0.000 020 84	0.7634	0.000 018 53
0.04	0.7069	0.000 033 35	0.8042	0.000 031 27	1.0179	0.000 027 79
0.05	0.8836	0.000 046 33	1.0053	0.000 043 43	1.2723	0.000 038 61
0.06	1.0603	0.000 061 16	1.2064	0.000 057 34	1.5268	0.000 050 97
0.07	1.2370	0.000 077 86	1.4074	0.000 073 00	1.7813	0.000 064 89
0.08	1.4137	0.000 096 41	1.6085	0.000 090 38	2.0358	0.000 080 34
0.09	1.5904	0.000 116 82	1.8096	0.000 109 52	2.2902	0.060 097 35
0.10	1.7671	0.000 139 09	2.0106	0.000 130 40	2.5447	0.000 115 91
0.11	1.9439	0.000 163 21	2.2117	0.000 153 02	2.7992	0.000 136 01
0.12	2.1206	0.000 189 19	2.4127	0.000 177 37	3.0536	0.000 157 66
0.13	2.2973	0.000 217 03	2.6138	0.000 203 47	3.3081	0.000 180 86
0.14	2.4740	0.000 246 73	2.8149	0.000 231 31	3.5626	0.000 205 61
0.15	2.6507	0.000 278 28	3.0159	0.000 260 89	3.8170	0.000 231 90
0.16	2.8274	0.000 311 69	3.2170	0.000 292 22	4.0715	0.000 259 75
0.17	3.0042	0.000 346 96	3.4181	0.000 325 28	4.3260	0.000 289 14
0.18	3.1809	0.000 384 09	3.6191	0.000 360 08	4.5805	0.000 320 08
0.19	3.3576	0.000 423 07	3.8202	0.000 396 63	4.8349	0.000 352 56
0.20	3.5343	0.000 463 91	4.0212	0.000 434 92	5.0894	0.000 386 60
0.22	3.8877	0.000 551 17	4.4234	0.000 516 72	5.5983	0.000 459 31
0.25	4.4179	0.000 695 97	5.0266	0.000 652 48	6.3617	0.000 579 98
0.28	4.9480	0.000 857 50	5.6297	0.000 803 91	7.1251	0.000 714 59
0.30	5.3014	0.000 974 47	6.0319	0.000 913 57	7.6341	0.000 812 06
0.32	5.6549	0.001 098 87	6.4340	0.001 030 20	8.1430	0.000 915 73
0.35	6.1850	0.001 299 41	7.0372	0.001 218 20	8.9064	0.001 082 84
0.38	6.7152	0.001 516 65	7.6404	0.001 421 87	9.6698	0.001 263 88
0.40	7.0686	0.001 670 77	8.0425	0.001 566 35	10.1788	0.001 392 31
0.42	7.4220	0.001 832 32	8.4446	0.001 717 80	10.6877	0.001 526 94
0.45	7.9522	0.002 088 57	9.0478	0.001 958 04	11.4511	0.001 740 48
0.48	8.4823	0.002 361 55	9.6510	0.002 213 95	12.2145	0.001 967 96
0.50	8.8357	0.002 552 81	10.0531	0.002 393 27	12.7235	0.002 127 35
0.55	9,7103	0.003 063 48	11.0584	0.002 872 02	13.9958	0.002 552 90
0.60	10.6029	0.003 620 59	12.0637	0.003 394 30	15.2682	0.003 017 16
0.65	11.4865	0.004 224 13	13.0690	0.003 960 12	16.5405	0.003 520 11
0.70	12.3700	0.004 874 11	14.0744	0.004 569 48	17.8129	0.004 061 76
0.75	13.2536	0.005 570 51	15.0797	0.005 222 36	19.0852	0.004 642 10
0.80	14.1372	0.006 313 36	16.0850	0.005 918 78	20.3576	0.005 261 14
0.85	15.0208	0.007 102 63	17.0903	0.006 658 72	21.6299	0.005 918 86
0.90	15.9043	0.007 938 35	18.0956	0.007 442 20	22.9023	0.006 615 29
0.95	16.7879	0.008 820 49	19.1009	0.008 269 22	24.1746	0.007 350 41

VITESSES moyennes.	Diamèt. de la conduite 0m.15 Section id. 0mc.0176715		Diamèt. de la conduite 0m.16 Section id. 0mc.02010624		Diamèt. de la conduite 0m.18 Section id. 0mc.02544696	
	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.
m.	l.	m.	l.	m.	l.	m.
1.00	17.6715	0.009 749 08	20.1062	0.009 139 77	25.4470	0.008 124 24
1.05	18.5550	0.010 724 09	21.1115	0.010 053 84	26.7193	0.008 936 75
1.10	19.4386	0.011 745 55	22.1169	0.011 011 45	27 9917	0.009 787 96
1.15	20.3222	0.012 813 43	23.1222	0.012 012 60	29.2640	0.010 677 86
1.20	21.2058	0.013 927 75	24.1275	0.013 057 27	30 5364	0.011 606 46
1.25	22.0893	0.015 088 51	25.1328	0.014 145 48	31.8087	0.012 573 76
1.30	22.9729	0.016 295 69	26.1381	0.015 277 22	33.0810	0.013 579 75
1.35	23.8565	0.017 549 32	27.1434	0.016 452 49	34.3534	0.014 624 44
1.40	24.7401	0.018 849 37	28.1487	0.017 671 29	35.6257	0.015 707 81
1.45	25.6237	0.020 195 87	29.1540	0.018 933 63	36.8981	0.016 829 89
1.50	26 5072	0.021 588 79	30.1594	0.020 239 50	38.1704	0.017 990 66
1.55	27.3908	0.023 028 16	31.1647	0.021 588 90	39.4428	0.019 190 13
1.60	28.2744	0.024 513 95	32.1700	0.022 981 83	40.7151	0.020 428 30
1.65	29.1580	0.026 046 19	33.1753	0.024 418 30	41.9875	0.021 705 16
1.70	30.0415	0.027 624 85	34.1806	0.025 898 30	43.2598	0.023 020 71
1.75	30.9251	0.029 249 95	35.1859	0.027 421 83	44.5322	0.024 374 96
1.80	31.8087	0.030 921 49	36.1912	0.028 988 90	45.8045	0.025 767 91
1.85	32.6922	0.032 639 45	37.1965	0.030 599 49	47.0769	0.027 199 55
1.90	33.5758	0.034 403 86	38.2019	0.032 253 62	48.3492	0.028 669 89
1.95	34.4594	0.036 214 69	39.2072	0.033 951 28	49.6216	0.030 178 91
2.00	35.3430	0.038 071 97	40.2125	0.035 692 47	50.8939	0.031 726 64
2.05	36.2265	0.039 975 67	41.2178	0.037 477 40	52.1663	0.033 313 06
2.10	37.1101	0.041 925 82	42.2231	0.039 305 46	53.4386	0.034 938 19
2.15	37.9937	0.043 922 39	43.2284	0.041 177 25	54.7110	0.036 602 00
2.20	38.8772	0.045 965 41	44.2337	0.043 092 57	55.9833	0.038 304 51
2.25	39.7608	0.048 054 85	45.2390	0.045 051 42	57.2557	0.040 045 71
2.30	40.6444	0.050 190 73	46.2443	0.047 053 81	58.5280	0.041 825 61
2.35	41.5279	0.052 373 04	47.2496	0.049 099 73	59.8004	0.043 644 20
2.40	42.4115	0.054 601 79	48.2550	0.051 189 18	61.0727	0.045 501 50
2.45	43.2951	0.056 876 97	49.2603	0.053 322 17	62.3451	0.047 397 48
2.50	44.1787	0.059 198 59	50.2656	0.055 498 68	63.6174	0.049 332 16
2.55	45.0623	0.061 566 65	51.2709	0.057 718 73	64.8897	0.051 305 54
2.60	45.9458	0.063 981 13	52.2762	0.059 982 32	66.1620	0.053 317 61
2.65	46.8294	0.066 442 05	53.2815	0.062 289 43	67.4344	0.055 368 38
2.70	47.7130	0.068 949 41	54.2868	0.064 640 08	68.7068	0.057 457 85
2.75	48.5966	0.071 503 20	55.2921	0.067 034 25	69.9791	0.059 586 00
2.80	49.4802	0.074 103 43	56.2975	0.069 471 97	71.2515	0.061 752 86
2.85	50.3637	0.076 750 09	57.3028	0.071 953 21	72 5238	0.063 958 41
2.90	51.2473	0.079 443 19	58.3081	0.074 477 99	73.7962	0.066 202 66
2.95	52.1309	0.082 182 71	59.3135	0.077 046 30	75.0685	0.068 485 60
3.00	53.0145	0.084 968 68	60.3187	0.079 658 14	76.3409	0.070 807 24

VITESSES moyennes.	Diamèt. de la conduite 0m.20 Section id. 0mc.031416		Diamèt. de la conduite 0m.22 Section id. 0mc.03801336		Diamèt. de la conduite 0m.24 Section id. 0mc.04523904	
	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.
m.	l.	m.	l.	m.	l.	m.
0.01	0.3142	0.000 004 17	0.3801	0.000 003 79	0.4524	0.000 003 47
0.02	0.6283	0.000 009 72	0.7603	0.000 008 84	0 9048	0.000 008 10
0.03	0.9425	0.000 016 67	1.1404	0.000 015 16	1.3572	0.000 013 90
0.04	1.2566	0.000 025 01	1.5205	0.000 022 74	1.8096	0.000 020 85
0.05	1.5708	0.000 034 75	1.9007	0.000 031 59	2.2619	0.000 028 96
0.06	1.8850	0.000 045 87	2.2808	0.000 041 70	2.7143	0.000 038 23
0.07	2.1991	0.000 058 40	2.6609	0.000 053 09	3.1667	0.000 048 67
0.08	2.5133	0.000 072 31	3.0411	0.000 065 73	3.6191	0.000 060 26
0.09	2.8274	0.000 087 62	3.4212	0.000 079 65	4.0715	0.000 073 02
0.10	3.1416	0.000 104 32	3.8013	0.000 094 83	4.5239	0.000 086 93
0.11	3.4558	0.000 122 41	4.1815	0.000 111 28	4.9763	0.000 102 01
0.12	3.7699	0.000 141 90	4.5616	0.000 129 00	5.4287	0.000 118 25
0.13	4.0841	0.000 162 78	4.9417	0.000 147 98	5.8811	0.000 135 65
0.14	4.3982	0.000 185 05	5.3219	0.000 168 23	6.3335	0.000 154 21
0.15	4.7124	0.000 208 71	5.7020	0.000 189 74	6.7859	0.000 173 93
0.16	5.0265	0.000 233 77	6.0821	0.000 212 52	7.2382	0.000 194 81
0.17	5.3407	0.000 260 22	6.4623	0.000 236 57	7.6906	0.000 216 85
0.18	5.6549	0.000 288 07	6.8424	0.000 261 88	8.1430	0.000 240 06
0.19	5.9690	0.000 317 30	7.2225	0.000 288 46	8.5954	0.000 264 42
0.20	6.2832	0.000 347 94	7.6027	0.000 316 31	9.0478	0.000 289 95
0.22	6.9116	0.000 413 38	8.3629	0.000 375 80	9.9526	0.000 344 48
0.25	7.8540	0.000 521 98	9.5033	0.000 474 53	11.3098	0.000 434 99
0.28	8.7964	0.000 643 13	10.6437	0.000 584 66	12.6669	0.000 535 94
0.30	9.4248	0.000 730 86	11.4040	0.000 664 42	13.5717	0.000 609 05
0.32	10.0531	0.000 824 16	12.1643	0.000 749 23	14.4765	0.000 686 80
0.35	10.9956	0.000 974 56	13.3047	0.000 885 96	15.8337	0.000 812 13
0.38	11.9380	0.001 137 49	14.4450	0 001 034 08	17.1908	0.000 947 91
0.40	12.5664	0.001 253 08	15.2053	0.001 139 17	18.0956	0.001 044 24
0.42	13.1947	0.001 374 24	15.9656	0.001 249 31	19.0004	0.001 145 20
0.45	14.1372	0.001 566 43	17.1060	0.001 424 03	20.3576	0.001 305 36
0.48	15.0797	0.001 771 16	18.2464	0.001 610 15	21.7147	0.001 475 97
0.50	15.7080	0.001 914 61	19.0067	0.001 740 56	22.6195	0.001 595 51
0.55	17.2788	0.002 297 61	20.9073	0.002 088 74	24.8815	0.001 914 68
0.60	18.8496	0.002 715 44	22.8080	0.002 468 58	27.1434	0.002 262 87
0.65	20.4204	0.003 168 10	24.7087	0.002 880 09	29.4054	0.002 640 08
0.70	21.9912	0.003 655 58	26.6094	0.003 323 26	31.6673	0 003 046 32
0.75	23.5620	0.004 177 89	28.5100	0.003 798 08	33.9293	0.003 481 57
0.80	25.1328	0.004 735 02	30.4107	0.004 304 57	36.1912	0.003 945 85
0.85	26.7036	0.005 326 98	32.3114	0.004 842 71	38.4532	0.004 439 15
0.90	28.2744	0.005 953 76	34.2120	0.005 412 51	40.7151	0.004 961 47
0.95	29.8452	0.006 615 37	36.1127	0.006 013 98	42.9771	0.005 512 81

VITESSES moyennes	Diamèt. de la conduite $0^m.20$ Section *id.* $0^{mc}.031416$		Diamèt. de la conduite $0^m.22$ Section *id.* $0^{mc}.03801336$		Diamèt. de la conduite $0^m.24$ Section *id.* $0^{mc}.04523904$	
	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.
m.	l.	m.	l.	m.	l.	m.
1.00	31.4160	0.007 311 81	38.0134	0.006 647 10	45.2390	0.006 093 18
1.05	32 9868	0.008 043 07	39.9140	0.007 311 88	47.5010	0.006 702 56
1.10	34.5576	0.008 809 16	41.8147	0.008 008 33	49.7629	0.007 340 97
1.15	36.1284	0.009 610 08	43.7154	0.008 736 43	52.0249	0.008 008 40
1.20	37.6992	0.010 445 82	45.6160	0.009 496 20	54.2868	0.008 704 85
1.25	39.2700	0.011 316 38	47.5167	0.010 287 62	56.5488	0.009 430 32
1.30	40.8408	0.012 221 77	49.4174	0.011 110 70	58.8108	0.010 184 81
1.35	42.4116	0.013 161 99	51.3180	0.011 965 45	61.0727	0.010 968 33
1.40	43.9824	0.014 137 03	53.2187	0.012 851 85	63.3347	0.011 780 86
1.45	45.5532	0.015 146 90	55.1194	0.013 769 91	65.5966	0.012 622 42
1.50	47.1240	0.016 191 60	57.0200	0.014 719 63	67.8586	0.013 493 00
1.55	48.6948	0.017 271 12	58.9207	0.015 701 02	70.1205	0.014 392 60
1.60	50.2656	0.018 385 47	60.8214	0.016 714 06	72.3825	0.015 321 22
1.65	51.8364	0.019 534 64	62.7220	0.017 758 77	74.6444	0.016 278 87
1.70	53.4072	0.020 718 64	64.6227	0.018 835 13	76.9064	0.017 265 54
1.75	54.9780	0.021 937 47	66.5234	0.019 943 15	79.1683	0.018 281 22
1.80	56.5488	0.023 191 12	68.4240	0.021 082 83	81.4303	0.019 325 93
1.85	58.1196	0.024 479 59	70.3247	0.022 254 18	83.6922	0.020 399 66
1.90	59.6904	0.025 802 90	72.2254	0.023 457 18	85.9542	0.021 502 42
1.95	61.2612	0.027 161 02	74.1261	0.024 691 84	88.2161	0.022 634 19
2.00	62.8320	0.028 553 98	76.0267	0.025 958 16	90.4781	0.023 794 98
2.05	64.4028	0.029 981 76	77.9274	0.027 256 14	92.7400	0.024 984 80
2.10	65.9736	0.031 444 37	79.8281	0.028 585 79	95.0020	0.026 203 64
2.15	67.5444	0.032 941 80	81.7287	0.029 947 09	97.2639	0.027 451 50
2.20	69.1152	0.034 474 06	83.6294	0 031 340 05	99.5259	0.028 728 38
2.25	70.6860	0.036 041 14	85.5301	0.032 764 67	101.7878	0.030 034 28
2.30	72.2568	0.037 643 05	87.4307	0.034 220 95	104.0498	0.031 369 21
2.35	73.8276	0.039 279 78	89.3314	0.035 708 89	106.3117	0.032 733 15
2.40	75.3984	0.040 951 35	91.2321	0.037 228 50	108.5737	0.034 126 12
2.45	76.9692	0.042 657 73	93.1327	0.038 779 76	110.8356	0.035 548 11
2.50	78.5400	0.044 398 95	95.0334	0.040 362 68	113.0976	0.036 999 12
2.55	80.1108	0.046 174 99	96.9341	0.041 977 26	115.3595	0.038 479 16
2.60	81.6816	0.047 985 85	98.8347	0.043 623 50	117.6215	0.039 988 21
2.65	83.2524	0.049 831 54	100.7354	0.045 301 40	119.8835	0.041 526 29
2.70	84.8232	0.051 712 06	102.6361	0.047 010 97	122.1454	0.043 093 39
2.75	86.3940	0.053 627 40	104.5367	0.048 752 18	124.4074	0.044 689 50
2.80	87.9648	0.055 577 57	106.4374	0.050 525 07	126.6693	0.046 314 65
2.85	89.5356	0.057 562 57	108.3381	0.052 329 61	128.9313	0.047 968 81
2.90	91.1064	0.059 582 39	110.2387	0.054 165 81	131.1932	0.049 652 00
2.95	92.6772	0.061 637 04	112.1394	0.056 033 67	133.4552	0.051 364 20
3.00	94.2480	0.063 726 51	114.0401	0.057 933 19	135.7171	0.053 105 43

VITESSES moyennes.	Diamèt. de la conduite 0m.25 Section *id.* 0mc.0490875		Diamèt. de la conduite 0m.28 Section *id.* 0mc.06157536		Diamèt. de la conduite 0m.30 Section *id.* 0mc.070686	
	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.
m.	l.	m.	l.	m.	l.	m.
0.01	0.4909	0.000 003 33	0.6158	0.000 002 98	0.7069	0.000 002 78
0.02	0.9817	0.000 007 78	1.2315	0.000 006 95	1.4137	0.000 006 48
0.03	1.4726	0.000 013 34	1.8473	0.000 011 91	2.1206	0.000 011 12
0.04	1.9635	0.000 020 01	2.4630	0.000 017 87	2.8274	0.000 016 68
0.05	2.4544	0.000 027 80	3.0788	0.000 024 82	3.5343	0.000 023 17
0.06	2.9452	0.000 036 70	3.6945	0.000 032 77	4.2412	0.000 030 58
0.07	3.4361	0.000 046 72	4.3103	0.000 041 71	4.9480	0.000 038 93
0.08	3.9270	0.000 057 84	4.9260	0.000 051 65	5.6549	0.000 048 21
0.09	4.4179	0.000 070 09	5.5418	0.000 062 59	6.3617	0.000 058 41
0.10	4.9087	0.000 083 45	6.1575	0.000 074 51	7.0686	0.000 069 55
0.11	5.3996	0.000 097 93	6.7733	0.000 087 44	7.7755	0.000 081 61
0.12	5.8905	0.000 113 52	7.3890	0.000 101 36	8.4823	0.000 094 60
0.13	6.3814	0.000 130 22	8.0048	0.000 116 27	9.1892	0.000 108 52
0.14	6.8722	0.000 148 04	8.6205	0.000 132 18	9.8960	0.000 123 37
0.15	7.3631	0.000 166 97	9.2363	0.000 149 08	10.6029	0.000 139 14
0.16	7.8540	0.000 187 02	9.8521	0.000 166 98	11.3098	0.000 155 85
0.17	8.3449	0.000 208 18	10.4678	0.000 185 88	12.0166	0.000 173 48
0.18	8.8357	0.000 230 45	11.0836	0.000 205 76	12.7235	0.000 192 05
0.19	9.3266	0.000 253 84	11.6993	0.000 226 64	13.4303	0.000 211 54
0.20	9.8175	0.000 278 35	12.3151	0.000 248 58	14.1372	0.000 231 96
0.22	10.7992	0.000 330 70	13.5466	0.000 295 27	15.5509	0.000 275 59
0.25	12.2719	0.000 417 58	15.3938	0.000 372 85	17.6715	0.000 347 99
0.28	13.7445	0.000 514 50	17.2411	0.000 459 38	19.7921	0.000 428 75
0.30	14.7262	0.000 584 68	18.4726	0.000 522 04	21.2058	0.000 487 24
0.32	15.7080	0.000 659 32	19.7041	0.000 588 69	22.6195	0.000 549 44
0.35	17.1806	0.000 779 64	21.5514	0.000 696 11	24.7401	0.000 649 71
0.38	18.6532	0.000 909 99	23.3986	0.000 812 50	26.8607	0.000 758 33
0.40	19.6350	0.001 002 46	24.6301	0.000 895 06	28.2744	0.000 835 39
0.42	20.6167	0.001 099 39	25.8616	0.000 981 60	29.6881	0.000 916 16
0.45	22.0894	0.001 253 14	27.7089	0 001 118 88	31.8087	0.001 044 29
0.48	23.5620	0.001 416 93	29.5562	0.001 265 12	33.9293	0.001 180 78
0.50	24.5437	0.001 531 69	30.7877	0.001 367 58	35.3430	0.001 276 41
0.55	26,9981	0.001 838 09	33.8664	0.001 641 15	38.8773	0.001 531 74
0.60	29.4525	0.002 172 35	36.9452	0.001 939 60	42.4116	0.001 810 30
0.65	31.9069	0.002 534 48	40.0240	0.002 262 93	45.9459	0.002 112 07
0.70	34.3612	0.002 924 46	43.1027	0.002 611 13	49.4802	0.002 437 06
0.75	36.8156	0.003 342 31	46.1815	0.002 984 21	53.0145	0.002 785 26
0.80	39.2700	0.003 788 02	49.2603	0.003 882 16	56.5488	0.003 156 68
0.85	41.7244	0.004 261 58	52.3391	0.003 804 99	60.0831	0.003 551 32
0.90	44.1787	0.004 763 01	55.4178	0.004 252 69	63.6174	0.003 969 18
0.95	46.6331	0.005 292 30	58.4966	0.004 725 27	67.1517	0.004 410 25

VITESSES moyennes.	Diamèt. de la conduite 0m.25 Section *id.* 0mc.0490875		Diamèt. de la conduite 0m.28 Section *id.* 0mc.06157536		Diamèt. de la conduite 0m.30 Section *id.* 0mc.070686	
	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.
m.	l.	m.	l.	m.	l.	m.
1.00	49.0875	0.005 849 45	61.5754	0.005 222 73	70.6860	0.004 874 54
1.05	51.5418	0.006 434 46	64.6541	0.005 745 05	74.2203	0.005 362 05
1.10	53.9962	0.007 047 33	67.7329	0.006 292 26	77.7546	0.005 872 78
1.15	56.4506	0.007 688 06	70.8117	0.006 864 34	81.2889	0.006 406 72
1.20	58.9050	0.008 356 65	73 8904	0.007 461 30	84.8232	0.006 963 88
1.25	61.3593	0.009 053 10	76.9692	0.008 083 13	88.3575	0.007 544 26
1.30	63.8137	0.009 777 42	80.0480	0.008 729 84	91.8918	0.008 147 85
1.35	66.2681	0.010 529 59	83.1267	0.009 401 43	95.4261	0.008 774 66
1.40	68.7225	0.011 309 62	86.2055	0.010 097 88	98.9604	0.009 424 69
1.45	71.1769	0.012 117 52	89.2843	0.010 819 22	102.4947	0.010 097 94
1.50	73.6312	0.012 953 28	92.3630	0.011 565 43	106.0290	0.010 794 40
1.55	76.0856	0.013 816 90	95 4418	0.012 336 52	109.5633	0.011 514 08
1.60	78.5400	0.014 708 37	98.5206	0.013 132 48	113.0976	0.012 256 98
1.65	80.9944	0.015 627 71	101.5993	0.013 953 32	116.6319	0.013 023 10
1.70	83.4487	0.016 574 91	104.6781	0.014 799 03	120.1662	0.013 812 43
1.75	85.9031	0.017 549 97	107.7569	0.015 669 62	123.7005	0.014 624 98
1.80	88.3575	0.018 552 89	110.8356	0.016 565 09	127.2348	0.015 460 75
1.85	90.8118	0.019 583 67	113.9144	0.017 485 43	130.7691	0 016 319 73
1.90	93.2662	0.020 642 32	116.9932	0.018 430 64	134.3034	0.017 201 93
1.95	95.7206	0.021 728 82	120.0719	0.019 400 73	137.8377	0.018 107 35
2.00	98.1750	0.022 843 18	123.1507	0.020 395 70	141.3720	0.019 035 99
2.05	100.6293	0.023 985 40	126.2295	0.021 415 54	144.9063	0.019 987 84
2.10	103.0837	0.025 155 49	129.3083	0.022 460 26	148.4406	0.020 962 91
2.15	105.5381	0 026 353 44	132.3870	0.023 529 85	151.9749	0.021 961 20
2.20	107.9924	0.027 579 24	135.4658	0.024 624 33	155.5092	0.022 982 71
2.25	110.4468	0.028 8[illegible]2 91	138.5446	0.025 743 67	159.0435	0.024 027 43
2.30	112.9012	0.030 114 44	141.6233	0.026 887 89	162.5778	0.025 095 37
2.35	115.3555	0.031 423 82	144.7021	0.028 056 99	166.1121	0.026 186 52
2.40	117.8099	0.032 761 08	147.7809	0.029 250 96	169.6464	0.027 300 90
2.45	120.2643	0.034 126 18	150.8596	0.030 469 81	173.1807	0.028 438 49
2.50	122.7187	0.035 519 16	153.9384	0.031 713 54	176.7150	0.029 599 30
2.55	125.1731	0.036 939 99	157.0172	0.032 982 14	180.2493	0.030 783 33
2.60	127.6274	0.038 388 68	160.0959	0.034 275 61	183.7836	0.031 990 57
2.65	130.0818	0.039 865 23	163.1747	0.035 593 96	187.3179	0.033 221 03
2.70	132.5362	0.041 369 65	166.2535	0.036 937 19	190.8522	0.034 474 71
2.75	134.9906	0.042 901 92	169.3322	0.038 305 29	194.3865	0.035 751 60
2.80	137.4450	0.044 462 06	172.4110	0.039 698 27	197.9208	0.037 051 72
2.85	139.8993	0.046 050 05	175.4898	0.041 116 12	201.4551	0.038 375 05
2.90	142.3537	0.047 665 91	178.5685	0.042 558 85	204.9894	0.039 721 60
2.95	144 8081	0.049 309 63	181.6473	0.044 026 46	208.5237	0.041 091 36
3.00	147.2625	0.050 981 21	184.7261	0.045 518 94	212.0580	0.042 464 34

VITESSES moyennes.	Diamèt. de la conduite 0m.32 Section *id.* 0mc.08042496		Diamèt. de la conduite 0m.35 Section *id.* 0mc.0962115		Diamèt. de la conduite 0m.38 Section *id.* 0mc.11341	
	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.
m.	l.	m.	l.	m.	l.	m.
0.01	0.8042	0.000 002 61	0.9621	0.000 002 38	1.1341	0.000 002 19
0.02	1.6085	0.000 006 08	1.9242	0.000 005 55	2.2682	0.000 005 12
0.03	2.4127	0.000 010 42	2.8863	0.000 009 53	3.4023	0.000 008 77
0.04	3.2170	0.000 015 64	3.8485	0.000 014 29	4.5364	0.000 013 16
0.05	4.0212	0.000 021 72	4.8106	0.000 019 85	5.6705	0.000 018 29
0.06	4.8255	0.000 028 67	5.7727	0.000 026 21	6.8046	0.000 024 14
0.07	5.6297	0.000 036 50	6.7348	0.000 033 37	7.9387	0.000 030 73
0.08	6.4340	0.000 045 19	7.6969	0.000 041 32	9.0728	0.000 038 06
0.09	7.2382	0.000 054 76	8.6590	0.000 050 07	10.2069	0.000 046 11
0.10	8.0425	0.000 065 20	9.6211	0.000 059 61	11.3410	0.000 054 90
0.11	8.8467	0.000 076 51	10.5833	0.000 069 95	12.4751	0.000 064 43
0.12	9.6510	0.000 088 69	11.5454	0.000 081 08	13.6092	0.000 074 68
0.13	10.4552	0.000 101 74	12.5075	0.000 093 01	14.7433	0.000 085 67
0.14	11.2595	0.000 115 66	13.4696	0.000 105 74	15.8774	0.000 097 39
0.15	12.0637	0.000 130 45	14.4317	0.000 119 26	17.0115	0.000 109 85
0.16	12.8680	0.000 146 11	15.3938	0.000 133 58	18.1456	0.000 123 04
0.17	13.6722	0.000 162 64	16.3560	0.000 148 70	19.2797	0.000 136 96
0.18	14.4765	0.000 180 04	17.3181	0.000 164 61	20.4138	0.000 151 61
0.19	15.2807	0.000 198 32	18.2802	0.000 181 31	21.5479	0.000 167 00
0.20	16.0850	0.000 217 46	19.2423	0.000 198 82	22.6820	0.000 183 13
0.22	17.6935	0.000 258 36	21.1665	0.000 236 21	24.9502	0.000 217 57
0.25	20.1062	0.000 326 24	24.0529	0.000 298 27	28.3525	0.000 274 73
0.28	22.5190	0.000 401 96	26.9392	0.000 367 50	31.7548	0.000 338 49
0.30	24.1275	0.000 456 79	28.8634	0.000 417 63	34.0230	0.000 384 66
0.32	25.7360	0.000 515 10	30.7877	0.000 470 95	36.2912	0.000 433 77
0.35	28.1487	0.000 609 10	33.6740	0.000 556 89	39.6935	0.000 512 92
0.38	30.5615	0.000 710 94	36.5604	0.000 649 99	43.0958	0.000 598 68
0.40	32.1700	0.000 783 18	38.4846	0.000 716 05	45.3640	0.000 659 52
0.42	33.7785	0.000 858 90	40.4088	0.000 785 28	47.6322	0.000 723 28
0.45	36.1912	0.000 979 02	43.2952	0.000 895 10	51.0345	0.000 824 44
0.48	38.6040	0.001 106 98	46.1815	0.001 012 09	54.4368	0.000 932 19
0.50	40.2125	0.001 196 64	48.1057	0.001 094 06	56.7050	0.001 007 69
0.55	44.2337	0.001 436 01	52.9163	0.001 312 92	62.3755	0.001 209 27
0.60	48.2550	0.001 697 15	57.7269	0.001 551 68	68.0460	0.001 429 18
0.65	52.2762	0.001 980 06	62.5375	0.001 810 34	73.7165	0.001 667 42
0.70	56.2975	0.002 284 74	67.3480	0.002 088 90	79.3870	0.001 923 99
0.75	60.3187	0.002 611 18	72.1586	0.002 387 36	85.0575	0.002 198 89
0.80	64.3400	0.002 959 39	76.9692	0.002 705 73	90.7280	0.002 492 12
0.85	68.3612	0.003 329 36	81.7798	0.003 043 99	96.3985	0.002 803 67
0.90	72.3825	0.003 721 10	86.5903	0.003 402 15	102.0690	0.003 133 55
0.95	76.4037	0.004 134 61	91.4009	0.003 780 21	107.7395	0.003 481 77

VITESSES moyennes.	Diamèt. de la conduite 0m.32 Section id. 0mc.08042496		Diamèt. de la conduite 0m.35 Section id. 0mc.0962115		Diamèt. de la conduite 0m.38 Section id. 0mc.11341	
	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.
m.	l.	m.	l.	m.	l.	m.
1.00	80.4250	0.004 569 89	96.2115	0.004 178 18	113.4100	0.003 848 32
1.05	84.4462	0.005 026 92	101.0221	0.004 596 04	119.0805	0.004 233 19
1.10	88.4675	0.005 505 73	105.8326	0.005 033 81	124.7510	0.004 636 40
1.15	92.4887	0.006 006 30	110.6432	0.005 491 47	130.4215	0.005 057 93
1.20	96.5100	0.006 528 64	115.4538	0.005 969 04	136.0920	0.005 497 80
1.25	100.5312	0.007 072 74	120.2644	0.006 466 50	141.7625	0.005 955 99
1.30	104.5524	0.007 638 61	125.0749	0.006 983 87	147.4330	0.006 432 51
1.35	108.5737	0.008 226 25	129.8855	0.007 521 14	153.1035	0.006 927 36
1.40	112.5949	0.008 835 65	134.6961	0.008 078 30	158.7740	0.007 440 54
1.45	116.6162	0.009 466 82	139.5067	0.008 655 37	164.4445	0.007 972 05
1.50	120.6374	0.010 119 75	144.3172	0.009 252 34	170.1150	0.008 521 89
1.55	124.6587	0.010 794 45	149.1278	0.009 869 21	175.7855	0.009 090 06
1.60	128.6799	0.011 490 92	153.9384	0.010 505 98	181.4560	0.009 676 56
1.65	132.7012	0.012 209 15	158.7490	0.011 162 65	187.1265	0.010 281 39
1.70	136.7224	0.012 949 15	163.5595	0.011 839 22	192.7970	0.010 904 55
1.75	140.7437	0.013 710 92	168.3701	0.012 535 69	198.4675	0.011 546 03
1.80	144.7649	0.014 494 45	173.1807	0.013 252 07	204.1380	0.012 205 85
1.85	148.7862	0.015 299 75	177.9913	0.013 988 34	209.8085	0.012 884 00
1.90	152.8074	0.016 126 81	182.8018	0.014 744 51	215.4790	0.013 580 47
1.95	156.8287	0.016 975 64	187.6124	0.015 520 58	221.1495	0.014 295 27
2.00	160.8499	0.017 846 24	192.4230	0.016 316 56	226.8200	0.015 028 41
2.05	164.8712	0.018 738 70	197.2336	0.017 132 43	232.4905	0.015 779 87
2.10	168.8924	0.019 652 73	202.0441	0.017 968 21	238.1610	0.016 549 67
2.15	172.9137	0.020 588 63	206.8547	0.018 823 88	243.8315	0.017 337 79
2.20	176.9349	0.021 546 29	211.6653	0.019 699 46	249.5020	0.018 144 24
2.25	180.9562	0.022 525 71	216.4759	0.020 594 93	255.1725	0.018 969 02
2.30	184.9774	0.023 526 90	221.2864	0.021 510 31	260.8430	0.019 812 13
2.35	188.9987	0.024 549 87	226.0970	0.022 445 59	266.5135	0.020 673 57
2.40	193.0199	0.025 594 59	230.9076	0.023 400 77	272.1840	0.021 553 34
2.45	197.0412	0.026 661 09	235.7182	0.024 375 85	277.8545	0.022 451 44
2.50	201.0624	0.027 749 34	240.5287	0.025 370 83	283.5250	0.023 367 86
2.55	205.0836	0.028 859 37	245.3393	0.026 385 71	289.1955	0.024 302 62
2.60	209.1048	0.029 991 16	250.1499	0.027 420 49	294.8660	0.025 255 71
2.65	213.1261	0.031 144 72	254.9604	0.028 475 17	300.5365	0.026 227 13
2.70	217.1474	0.032 320 04	259.7710	0.029 549 75	306.2070	0.027 216 87
2.75	221.1686	0.033 517 13	264.5816	0.030 644 23	311.8775	0.028 224 95
2.80	225.1899	0.034 735 99	269.3922	0.031 758 61	317.5480	0.029 251 35
2.85	229.2111	0.035 976 61	274.2027	0.032 892 89	323.2185	0.030 296 09
2.90	233.2324	0.037 239 00	279.0133	0.034 047 08	328.8890	0.031 359 15
2.95	237.2536	0.038 523 15	283.8239	0.035 221 16	334.5595	0.032 440 54
3.00	241.2749	0.039 829 07	288.6345	0.036 415 15	340.2300	0.033 540 27

VITESSES moyennes.	Diamèt. de la conduite 0m.40 Section id. 0mc.125664		Diamèt. de la conduite 0m.42 Section id. 0mc.13854456		Diamèt. de la conduite 0m.45 Section id. 0mc.1590435	
	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.
m.	l.	m.	l.	m.	l.	m.
0.01	1.2566	0.000 002 09	1.3854	0.000 001 98	1.5904	0.000 001 85
0.02	2.5133	0.000 004 86	2.7709	0.000 004 63	3.1809	0.000 004 32
0.03	3.7699	0.000 008 34	4.1563	0.000 007 94	4.7713	0.000 007 41
0.04	5.0266	0.000 012 51	5.5418	0.000 011 91	6.3617	0.000 011 12
0.05	6.2832	0.000 017 38	6.9272	0.000 016 55	7.9522	0.000 015 44
0.06	7.5398	0.000 022 94	8.3127	0.000 021 84	9.5426	0.000 020 39
0.07	8.7965	0.000 029 20	9.6981	0.000 027 81	11.1330	0.000 025 95
0.08	10.0531	0.000 036 16	11.0836	0.000 034 43	12.7235	0.000 032 14
0.09	11.3098	0.000 043 81	12.4690	0.000 041 72	14.3139	0.000 038 94
0.10	12.5664	0.000 052 16	13.8545	0.000 049 67	15.9043	0.000 046 36
0.11	13.8230	0.000 061 21	15.2399	0.000 058 29	17.4948	0.000 054 40
0.12	15.0797	0.000 070 95	16.6253	0.000 067 57	19.0852	0.000 063 06
0 13	16.3363	0.000 081 39	18.0108	0.000 077 51	20.6757	0.000 072 34
0.14	17.5930	0.000 092 53	19.3962	0.000 088 12	22.2661	0.000 082 24
0.15	18.8496	0.000 104 36	20.7817	0.000 099 39	23.8565	0.000 092 76
0.16	20.1062	0.000 116 89	22.1671	0.000 111 32	25.4470	0.000 103 90
0.17	21.3629	0.000 130 11	23.5526	0.000 123 92	27.0374	0.000 115 65
0.18	22.6195	0.000 144 04	24.9380	0.000 137 17	28.6278	0.000 128 03
0.19	23 8762	0.000 158 65	26.3235	0.000 151 09	30.2183	0.000 141 02
0.20	25.1328	0.000 173 97	27.7089	0.000 165 72	31.8087	0.000 154 64
0.22	27.6461	0.000 206 69	30.4798	0.000 196 85	34.9896	0.000 183 72
0.25	31.4160	0.000 260 99	34.6361	0.000 248 56	39.7609	0.000 231 99
0.28	35.1859	0.000 321 57	38.7925	0.000 306 25	44.5322	0.000 285 83
0.30	37.6992	0.000 365 43	41.5634	0.000 348 03	47.7130	0.000 324 82
0.32	40.2125	0.000 412 08	44.3343	0.000 392 46	50.8939	0.000 366 29
0.35	43.9824	0.000 487 28	48.4906	0.000 464 07	55.6652	0.000 433 14
0.38	47.7523	0.000 568 75	52.6469	0.000 541 66	60.4365	0.000 505 55
0.40	50.2656	0.000 626 54	55.4178	0.000 596 71	63.6174	0.000 556 92
0.42	52.7789	0.000 687 12	58.1887	0.000 654 40	66.7983	0.000 610 77
0.45	56.5488	0.000 783 22	62.3451	0.000 745 92	71.5696	0.000 696 19
0.48	60.3187	0.000 885 58	66.5014	0.000 843 41	76.3409	0.000 787 18
0.50	62.8320	0.000 957 31	69.2723	0.000 911 72	79.5217	0.000 850 94
0.55	69.1152	0.001 148 81	76.1995	0.001 094 10	87.4739	0.001 021 16
0.60	75.3984	0.001 357 72	83.1267	0.001 293 07	95.4261	0.001 206 86
0.65	81.6816	0.001 584 05	90.0540	0.001 508 62	103.3783	0.001 408 04
0.70	87.9648	0.001 827 79	96.9812	0.001 740 75	111.3304	0.001 624 70
0.75	94.2480	0.002 088 95	103.9084	0.001 989 47	119.2826	0.001 856 84
0.80	100.5312	0.002 367 51	110.8356	0.002 254 77	127.2348	0.002 104 45
0.85	106.3144	0.002 663 49	117.7629	0.002 536 66	135.1870	0.002 367 54
0.90	113.0976	0.002 976 88	124.6901	0.002 835 12	143.1391	0.002 646 12
0.95	110.3808	0.003 307 69	131.6173	0.003 150 18	151.0913	0.002 940 16

VITESSES moyennes.	Diamèt. de la conduite $0^{m}.40$ Section *id.* $0^{mc}.125664$		Diamèt. de la conduite $0^{m}.42$ Section *id.* $0^{mc}.13854456$		Diamèt. de la conduite $0^{m}.45$ Section *id.* $0^{mc}.1590435$	
	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite
m.	l.	m.	l.	m.	l.	m.
1.00	125.6640	0.003 635 91	138.5446	0.003 481 82	159.0435	0.003 249 69
1.05	131.9472	0.004 021 54	145.4718	0.003 830 03	166.9957	0.003 574 70
1.10	138.2304	0.004 404 58	152.3990	0.004 194 84	174.9478	0.003 915 18
1.15	144.5136	0.004 805 04	159.3262	0.004 576 23	182.9000	0.004 271 14
1.20	150.7968	0.005 222 91	166.2535	0.004 974 20	190.8522	0.004 642 58
1.25	157.0800	0.005 658 19	173.1807	0.005 388 75	198.8044	0.005 029 50
1.30	163.3632	0.006 110 88	180.1079	0.005 819 89	206.7565	0.005 431 90
1.35	169.6464	0.006 581 00	187.0352	0.006 267 62	214.7087	0.005 849 77
1.40	175.9296	0.007 068 52	193.9624	0.006 731 92	222.6609	0.006 283 12
1.45	182.2128	0.007 573 45	200.8896	0.007 212 81	230.6131	0.006 731 96
1.50	188.4960	0.008 095 80	207.8168	0.007 710 28	238.5652	0.007 196 26
1.55	194.7792	0.008 635 56	214.7441	0.008 224 34	246.5174	0.007 676 05
1.60	201.0624	0.009 192 74	221.6713	0.008 754 98	254.4696	0.008 171 32
1.65	207.3456	0.009 767 32	228.5985	0.009 302 21	262.4218	0.008 682 06
1.70	213.6288	0.010 359 32	235.5258	0.009 866 02	270.3739	0.009 208 28
1.75	219.9120	0.010 968 74	242.4530	0.010 446 41	278.3261	0.009 749 98
1.80	226.1952	0.011 595 56	249.3802	0.011 043 39	286.2783	0.010 307 16
1.85	232.4784	0.012 239 80	256.3074	0.011 656 95	294.2305	0.010 879 82
1.90	238.7616	0.012 901 45	263.2347	0.012 287 09	302.1826	0.011 467 95
1.95	245.0448	0.013 580 51	270.1619	0.012 933 82	310.1348	0.012 071 56
2.00	251.3280	0.014 276 99	277.0891	0.013 597 13	318.0870	0.012 690 66
2.05	257.6112	0.014 990 88	284.0164	0.014 277 03	326.0392	0.013 325 22
2.10	263.8944	0.015 722 19	290.9436	0.014 973 51	333.9913	0.013 975 27
2.15	269.1776	0.016 470 90	297.8708	0.015 686 57	341.9435	0.014 640 80
2.20	276.4608	0.017 237 03	304.7980	0.016 416 22	349.8957	0.015 321 80
2.25	282.7440	0.018 020 57	311.7253	0.017 162 45	357.8479	0.016 018 28
2.30	289.0272	0.018 821 53	318.6525	0.017 925 26	365.8000	0.016 730 24
2.35	295.3104	0.019 639 89	325.5797	0.018 704 66	373.7522	0.017 457 68
2.40	301.5936	0.020 475 68	332.5069	0.019 500 64	381.5044	0.018 200 60
2.45	307.8768	0.021 328 87	339.4342	0.020 313 21	389.6566	0.018 958 99
2.50	314.1600	0.022 199 48	346.3614	0.021 142 36	397.6087	0.019 732 86
2.55	320.4432	0.023 087 50	353.2886	0.021 988 09	405.5609	0.020 522 22
2.60	326.7264	0.023 992 93	360.2159	0.022 850 41	413.5131	0.021 327 04
2.65	333.0096	0.024 915 77	367.1431	0.023 729 31	421.4652	0.022 147 35
2.70	339.2928	0.025 856 03	374.0703	0.024 624 79	429.4174	0.022 983 14
2.75	345.5760	0.026 813 70	380.9975	0.025 536 86	437.3696	0.023 834 40
2.80	351.8592	0.027 788 79	387.9248	0.026 465 51	445.3218	0.024 701 14
2.85	358.1424	0.028 781 29	394.8520	0.027 410 75	453.2739	0.025 583 36
2.90	364.4256	0.029 791 20	401.7792	0.028 372 57	461.2261	0.026 481 06
2.95	370.7088	0.030 818 52	408.7064	0.029 350 97	469.1783	0.027 394 24
3.00	376.9920	0.031 863 26	415.6337	0.030 345 96	477.1305	0.028 322 89

VITESSES moyennes	Diamèt. de la conduite 0m.48 Section *id.* 0mc.18095616		Diamèt. de la conduite 0m.50 Section *id.* 0mc.19635		Diamèt. de la conduite 0m.55 Section *id.* 0mc.2375835	
	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.
m.	l.	m.	l.	m.	l.	m.
0.01	1.8096	0.000 001 74	1.9635	0.000 001 67	2.3758	0.000 001 51
0.02	3.6191	0.000 004 05	3.9270	0.000 003 89	4.7517	0.000 003 54
0.03	5.4287	0.000 006 95	5.8905	0.000 006 67	7.1275	0.000 006 06
0.04	7.2382	0.000 010 43	7.8540	0.000 010 01	9.5033	0.000 009 09
0.05	9.0478	0.000 014 48	9.8175	0.000 013 90	11.8792	0.000 012 63
0.06	10.8574	0.000 019 12	11.7810	0.000 018 35	14.2550	0.000 016 68
0.07	12.6669	0.000 024 34	13.7445	0.000 023 36	16.6308	0.000 021 23
0.08	14.4765	0.000 030 13	15.7080	0.000 028 92	19.0067	0.000 026 29
0.09	16.2861	0.000 036 51	17.6715	0.000 035 05	21.3825	0.000 031 86
0.10	18.0956	0.000 043 47	19.6350	0.000 041 73	23.7583	0.000 037 93
0.11	19.9052	0.000 051 01	21.5985	0.000 048 97	26.1342	0.000 044 51
0.12	21.7147	0.000 059 13	23.5620	0.000 056 76	28.5100	0.000 051 60
0.13	23.5243	0.000 067 83	25.5255	0.000 065 11	30.8859	0.000 059 19
0.14	25.3339	0.000 077 11	27.4890	0.000 074 02	33.2617	0.000 067 29
0.15	27.1434	0.000 086 97	29.4525	0.000 083 49	35.6375	0.000 075 89
0.16	28.9530	0.000 097 41	31.4160	0.000 093 51	38.0134	0.000 085 01
0.17	30.7625	0.000 108 43	33.3795	0.000 104 09	40.3892	0.000 094 63
0.18	32.5721	0.000 120 03	35.3430	0.000 115 23	42.7650	0.000 104 75
0.19	34.3817	0.000 132 21	37.3065	0.000 126 92	45.1409	0.000 115 38
0.20	36.1912	0.000 144 98	39.2700	0.000 139 17	47.5167	0.000 126 52
0.22	39.8104	0.000 172 24	43.1970	0.000 165 35	52.2684	0.000 150 32
0.25	45.2390	0.000 217 50	49.0875	0.000 208 79	59.3959	0.000 189 81
0.28	50.6677	0.000 267 97	54.9780	0.000 257 25	66.5234	0.000 233 86
0.30	54.2868	0.000 304 53	58.9050	0.000 292 34	71.2750	0.000 265 77
0.32	57.9060	0.000 343 40	62.8320	0.000 329 66	76.0267	0.000 299 69
0.35	63.3347	0.000 406 07	68.7225	0.000 389 82	83.1542	0.000 354 38
0.38	68.7633	0.000 473 96	74.6130	0.000 455 00	90.2817	0.000 413 63
0.40	72.3825	0.000 522 12	78.5400	0.000 501 23	95.0334	0.000 455 67
0.42	76.0016	0.000 572 60	82.4670	0.000 549 70	99.7851	0.000 499 72
0.45	81.4303	0.000 652 68	88.3575	0.000 626 57	106.9126	0.000 569 61
0.48	86.8590	0.000 737 99	94.2480	0.000 708 47	114.0401	0.000 644 06
0.50	90.4781	0.000 797 76	98.1750	0.000 765 84	118.7917	0.000 696 22
0.55	99.5259	0.000 957 34	107.9925	0.000 919 04	130.6709	0.000 835 49
0.60	108.5737	0.001 131 44	117.8100	0.001 086 18	142.5501	0.000 987 43
0.65	117.6215	0.001 320 04	127.6275	0.001 267 24	154.4293	0.001 152 03
0.70	126.6693	0.001 523 16	137.4450	0.001 462 23	166.3084	0.001 329 30
0.75	135.7171	0.001 740 79	147.2625	0.001 671 15	178.1876	0.001 519 23
0.80	144.7649	0.001 972 93	157.0800	0.001 894 01	190.0668	0.001 721 83
0.85	153.8127	0.002 219 58	166.8975	0.002 130 79	201.9460	0.001 937 08
0.00	162.8605	0.002 480 74	176.7150	0.002 381 50	213.8251	0.002 165 00
0.95	171.9084	0.002 756 41	186.5325	0.002 646 15	225.7043	0.002 405 59

VITESSES moyennes.	Diamèt. de la conduite 0m.48 Section *id.* 0mc.18095616		Diamèt. de la conduite 0m.50 Section *id.* 0mc.19635		Diamèt. de la conduite 0m.5[illegible] Section *id.* 0mc.23758[illegible]	
	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.
m.	l.	m.	l.	m.	l.	m.
1.00	180.9562	0.003 046 59	196.3500	0.002 924 72	237.5835	0.002 658 8[illegible]
1.05	190.0040	0.003 351 28	206.1675	0.003 217 23	249.4627	0.002 924 7[illegible]
1.10	199.0518	0.003 670 49	215.9850	0.003 523 66	261.3418	0.003 203 3[illegible]
1.15	208.0996	0.004 004 20	225.8025	0.003 844 03	273.2210	0.003 494 5[illegible]
1.20	217.1474	0.004 352 43	235.6200	0.004 178 33	285.1002	0.003 798 4[illegible]
1.25	226.1952	0.004 715 16	245.4375	0.004 526 55	296.9794	0.004 115 0[illegible]
1.30	235.2430	0.005 092 41	255.2550	0.004 888 71	308.8585	0.004 444 2[illegible]
1.35	244.2908	0.005 484 17	265.0725	0.005 264 80	320.7377	0.004 786 1[illegible]
1.40	253.3386	0.005 890 43	274.8900	0.005 654 81	332.6169	0.005 140 7[illegible]
1.45	262.3864	0.006 311 21	284.7075	0.006 058 76	344.4961	0.005 507 9[illegible]
1.50	271.4342	0.006 746 50	294.5250	0.006 476 64	356.3752	0.005 887 8[illegible]
1.55	280.4820	0.007 196 30	304.3425	0.006 908 45	368.2544	0.006 280 4[illegible]
1.60	289.5299	0.007 660 61	314.1600	0.007 354 19	380.1336	0.006 685 6[illegible]
1.65	298.5777	0.008 139 44	323.9775	0.007 813 86	392.0128	0.007 103 5[illegible]
1.70	307.6255	0.008 632 77	333.7950	0.008 287 46	403.8919	0.007 534 0[illegible]
1.75	316.6733	0.009 140 61	343.6125	0.008 774 99	415.7711	0.007 977 20
1.80	325.7211	0.009 662 97	353.4300	0.009 276 45	427.6503	0.008 433 13
1.85	334.7689	0.010 199 83	363.2475	0.009 791 84	439.5295	0.008 901 67
1.90	343.8167	0.010 751 21	373.0650	0.010 321 16	451.4086	0.009 382 87
1.95	352.8645	0.011 317 10	382.8825	0.010 864 41	463.2878	0.009 876 73
2.00	361.9123	0.011 897 49	392.7000	0.011 421 59	475.1670	0.010 383 26
2.05	370.9601	0.012 492 40	402.5175	0.011 992 70	487.0462	0.010 902 46
2.10	380.0079	0.013 101 82	412.3350	0.012 577 75	498.9253	0.011 434 31
2.15	389.0557	0.013 725 75	422.1525	0.013 176 72	510.8045	0.011 978 83
2.20	398.1036	0.014 364 19	431.9700	0.013 789 62	522.6837	0.012 536 02
2.25	407.1514	0.015 017 14	441.7875	0.014 416 45	534.5629	0.013 105 87
2.30	416.1992	0.015 684 61	451.6050	0.015 057 22	546.4420	0.013 688 38
2.35	425.2470	0.016 366 58	461.4225	0.015 711 91	558.3212	0.014 283 56
2.40	434.2948	0.017 063 06	471.2400	0.016 380 54	570.2004	0.014 891 40
2.45	443.3426	0.017 774 06	481.0575	0.017 063 09	582.0796	0.015 511 90
2.50	452.3904	0.018 499 56	490.8750	0.017 759 58	593.9587	0.016 145 07
2.55	461.4382	0.019 239 58	500.6925	0.018 469 99	605.8379	0.016 790 90
2.60	470.4860	0.019 994 11	510.5100	0.019 194 34	617.7171	0.017 449 40
2.65	479.5338	0.020 763 15	520.3275	0.019 932 62	629.5962	0.018 120 56
2.70	488.5816	0.021 546 70	530.1450	0.020 684 82	641.4754	0.018 804 39
2.75	497.6294	0.022 344 75	539.9625	0.021 450 96	653.3546	0.019 500 87
2.80	506.6772	0.023 157 33	549.7800	0.022 231 03	665.2337	0.020 210 03
2.85	515.7251	0.023 984 41	559.5975	0.023 025 03	677.1129	0.020 931 84
2.90	524.7729	0.024 826 00	569.4150	0.023 832 96	688.9921	0.021 666 32
2.95	533.8207	0.025 682 10	579.2325	0.024 654 81	700.8713	0.022 413 47
3.00	542.8685	0.026 552 72	589.0500	0.025 490 60	712.7505	0.023 173 28

VITESSES moyennes.	Diamèt. de la conduite 0m.60 Section *id.* 0mc.282744		VITESSES moyennes.	Diamèt. de la conduite 0m.60 Section *id.* 0mc.282744	
	Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.		Dépenses en litres par seconde.	Charges par mètre de longueur de conduite.
m.	l.	m.	m.	l.	m.
0.01	2.8274	0.000 001 39	1.00	282.7440	0.002 437 27
0.02	5.6549	0.000 003 24	1.05	296.8812	0.002 681 02
0.03	8.4823	0.000 005 56	1.10	311.0184	0.002 936 39
0.04	11.3098	0.000 008 34	1.15	325.1556	0.003 203 36
0.05	14.1372	0.000 011 58	1.20	339.2928	0.003 481 94
0.06	16.9646	0.000 015 29	1.25	353.4300	0.003 772 13
0.07	19.7921	0.000 019 47	1.30	367.5672	0.004 073 92
0.08	22.6195	0.000 024 10	1.35	381.7044	0.004 387 33
0.09	25.4470	0.000 029 21	1.40	395.8416	0.004 712 34
0.10	28.2744	0.000 034 77	1.45	409.9788	0.005 048 97
0.11	31.1018	0.000 040 80	1.50	424.1160	0.005 397 20
0.12	33.9293	0.000 047 30	1.55	438.2532	0.005 757 04
0.13	36.7567	0.000 054 26	1.60	452.3904	0.006 128 49
0.14	39.5842	0.000 061 68	1.65	466.5276	0.006 511 55
0.15	42.4116	0.000 069 57	1.70	480.6648	0.006 906 21
0.16	45.2390	0.000 077 92	1.75	494.8020	0 007 312 49
0.17	48.0665	0.000 086 74	1.80	508.9392	0.007 730 37
0.18	50.8939	0.000 096 02	1.85	523.0764	0.008 159 86
0.19	53.7214	0.000 105 77	1.90	537.2136	0.008 600 97
0.20	56.5488	0.000 115 98	1.95	551.3508	0.009 053 67
0.22	62.2037	0.000 137 79	2.00	565.4880	0.009 517 99
0.25	70.6860	0.000 173 99	2.05	579.6252	0.009 993 92
0.28	79.1683	0.000 214 38	2.10	593.7624	0.010 481 46
0.30	84.8232	0.000 243 62	2.15	607.8996	0.010 980 60
0.32	90.4781	0.000 274 72	2.20	622.0368	0 011 491 35
0.35	98.9604	0.000 324 85	2.25	636.1740	0.012 013 71
0.38	107.4427	0.000 379 16	2.30	650.3112	0.012 547 68
0.40	113.0976	0.000 417 69	2.35	664.4484	0.013 093 26
0.42	118.7525	0.000 458 08	2.40	678.5856	0.013 650 45
0.45	127.2348	0.000 522 14	2.45	692.7228	0.014 219 24
0.48	135.7171	0.000 590 39	2.50	706.8600	0.014 799 65
0.50	141.3720	0.000 638 20	2.55	720.9972	0.015 391 66
0.55	155.5092	0.000 765 87	2.60	735.1344	0.016 995 28
0.60	169.6464	0.000 905 15	2.65	749.2716	0.016 610 51
0.65	183.7836	0.001 056 03	2.70	763.4088	0.017 237 35
0.70	197.9208	0.001 218 53	2.75	777.5460	0.017 875 80
0.75	212.0580	0.001 392 63	2.80	791.6832	0.018 525 86
0.80	226.1952	0.001 578 34	2.85	805.8204	0.019 187 52
0.85	240.3324	0.001 775 66	2.90	819.9576	0.019 860 80
0.90	254.4696	0.001 984 59	2.95	834.0948	0.020 545 68
0.95	268.6068	0.002 205 12	3.00	848.2320	0.021 242 17

La table précédente va nous servir à résoudre quelques problèmes dont la solution serait assez longue avec le secours seul de la table de de Prony (185).

188. 1er **Problème.** *Soit* (problème déjà résolu au n° 186) *à déterminer le diamètre d'une conduite de* 5000 *mètres de longueur, capable de débiter* 60 *mètres cubes d'eau par heure ou* 16litres,6667 *par seconde, la charge totale étant* 5 *mètres, ce qui donne la charge de* 0m,001 *par mètre de longueur de conduite.*

On cherche, en considérant successivement les différants diamètres de la table, quel est le plus petit de ces diamètres capable de dépenser le volume 16l,6667 par seconde, ou le volume immédiatement supérieur, sans que la charge correspondante dépasse 0m,001, et ce plus petit diamètre est celui qu'il convient d'employer.

Considérant le diamètre 0m,20, on voit que la dépense 17l,2788, immédiatement supérieure à 16l,6667, correspond à une charge de 0m,00229761 par mètre de longueur de conduite; le diamètre 0m,20 est donc trop faible.

Pour le diamètre 0m,22, la dépense 17l,1060 correspondant à la charge 0m,00142403, ce diamètre n'est pas encore assez grand.

Pour le diamètre 0m,24, la dépense 17l,1908 correspondant à la charge 0m,00094791, ce diamètre est plus que suffisant pour produire le débit 16l,6667 sous une charge de 0m,001; mais l'excès de dépense qu'il pourra produire compensera les dépôts dont il a été déjà question (186). Puisque le diamètre 0m,24 satisfait aux conditions du problème, à plus forte raison les diamètres supérieurs devront-ils y satisfaire.

189. 2e **Problème.** *Il s'agit, au moyen d'une machine à vapeur, d'élever par heure* 60 *mètres cubes d'eau à* 25 *mètres de hauteur au-dessus du niveau du puisard des pompes; la longueur totale de la conduite, qui a un diamètre constant sur toute sa longueur, est de* 1000 *mètres; on demande quel diamètre on devra donner à la conduite, sachant qu'elle n'alimente aucun branchement sur son parcours.*

Si l'on n'avait à considérer que les frais d'établissement de la conduite, il est évident que l'on devrait adopter le plus petit diamètre capable de débiter 60 mètres cubes par heure ou 16l,6667 par seconde, sans que la vitesse moyenne dépassât 3 mètres par seconde (186); mais comme la charge à vaincre et par suite la force de la machine augmentent à mesure que le diamètre de la conduite diminue, il faut, pour résoudre le plus convenablement possible le problème en question, dresser un tableau des prix d'établissement des différentes conduites et des machines qui leur sont nécessaires, et faire entrer dans la comparaison de ces prix les intérêts des sommes dépensées ainsi que les dépenses annuelles de charbon et d'entretien; il faut avoir égard aussi au renouvellement du matériel.

On doit donc se rendre compte de la force des machines pour les différents diamètres susceptibles d'être employés. Le plus petit des diamètres dont on peut faire usage est 0m,09, lequel, pour une dépense de 16l,8586, exige une charge de 0m,11073676 par mètre de longueur de

conduite. La charge, à très peu près exacte, pour le volume $16^l,6667$ que doit dépenser la conduite, s'obtient par une simple proportion : on remarque que pour la différence $0^l,3181$, des deux dépenses successives $16^l,8586$ et $16^l,5405$ de la table, la différence de charge par mètre de longueur de conduite est $0^m,11073676 - 0^m,10663522 = 0^m,00410154$, ou à peu près $0^m,0041$; alors, pour la différence $16^l,8586 - 16^l,6667 = 0^l,1919$, on conclura la différence de charge x de la proportion :

$$0,3181 : 0,1919 = 0,0041 : x,$$

qui donne $x = 0^m,002473$. La charge correspondant à la dépense $16^l,6667$ est donc $0^m,11073676 - 0^m,002473 = 0^m,10826$ environ. Pour les 1000 mètres de longueur de conduite, la charge sera alors de $108^m,26$, auxquels il faut encore ajouter les 25 mètres d'élévation de l'eau, ce qui donne une charge totale définitive de $133^m,26$. L'effet utile de la machine, non compris le frottement des pompes, sera donc de $133,26 \times 60000 = 7995600$ kilogrammètres par heure, ce qui correspond à une force de $\frac{7995600}{270000} = 29,61$ chevaux (36), soit 30 chevaux, en nombre rond.

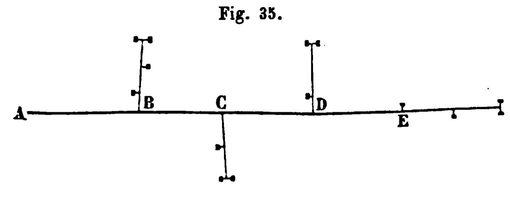
En opérant de la même manière pour les diamètres successifs $0^m,12$, $0^m,15$, $0^m,20$, $0^m,25$, on obtient les résultats du tableau suivant (196) :

DIAMÈTRE de la conduite.	CHARGE J par mètre.	CHARGE TOTALE due au mouvement de l'eau et à son élévation.	EFFET UTILE de la machine en kilogrammètres par heure.	FORCE de la machine en chevaux.
m.	m.	m.		
0,09	0,10826	108,26 + 25 = 133,26	7995600	29,61
0,12	0,02607	26,07 + 25 = 51,07	3063960	11,35
0,15	0,00870	8,70 + 25 = 33,70	2022000	7,49
0,20	0,00215	2,15 + 25 = 27,15	1629000	6,03
0,25	0,00074	0,74 + 25 = 25,74	1544400	5,72

Des considérations économiques permettront d'opter pour tel ou tel diamètre.

190. 3e **Problème.** *Distribution d'eau au moyen d'une conduite* AE *de diamètre uniforme sur toute sa longueur, alimentant sur son parcours différents écoulements* B, C, D *et* E, *de débits déterminés : chacun de ces écoulements alimente, par exemple, un certain nombre de bornes-fontaines.*

Fig. 35.

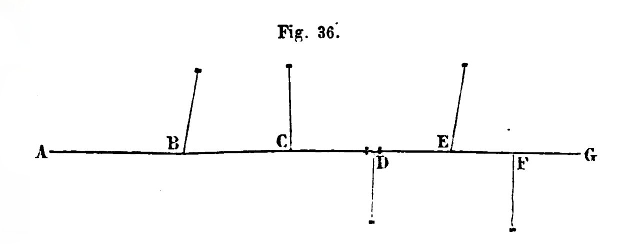


Il faut que le diamètre de la conduite soit tel, que la charge à l'origine de chaque écoulement soit suffisante pour que l'eau s'élève au

moins à quelques décimètres au-dessus des orifices des bornes-fontaines alimentées par ces écoulements. Pour déterminer ce diamètre, on lui suppose une première valeur qu'on préjuge convenable; on détermine la perte de charge qui a lieu du point A, origine de la conduite, au point B, premier écoulement; ce qu'on fait en opérant comme au premier problème (188); car ayant le débit de cette partie AB, débit qui est égal à celui de toute la conduite, et son diamètre, la table du n° 187 donne la perte de charge par mètre; laquelle multipliée par la distance des points A et B, qui est connue, donne la perte totale de charge pour la partie de conduite comprise entre ces deux points. Retranchant cette perte de la charge théorique au point B, c'est-à-dire de la différence de hauteur du point B et du niveau de l'eau dans le réservoir alimentaire, placé au point A, on a la charge réelle au point B; charge qui doit être capable d'élever l'eau aux bornes-fontaines alimentées par l'écoulement B. On détermine ensuite la perte de charge qui a lieu du point B au point C; pour cela, on opère comme de A en B, en remarquant seulement que le volume débité par cette portion de conduite est égal à celui débité par la partie AB, moins le volume qui s'écoule par le branchement B. Ayant la perte de charge qui a lieu de B en C, on l'ajoute à celle trouvée pour la partie AB; ce qui donne la perte totale de A en C; laquelle, retranchée de la charge théorique en C, donne la charge réelle en ce point; charge qui doit aussi être suffisante pour produire l'écoulement par les bornes alimentées par le branchement C. On opère ensuite pour les parties successives CD, DE de la conduite comme pour les précédentes, et l'on voit si la charge à l'origine de tous les branchements est suffisante pour produire un écoulement convenable par les bornes. Si cette charge n'était pas suffisante, on essayerait un diamètre plus grand, et si l'on avait un excès de pression, on vérifierait un diamètre plus petit.

191. 4e Problème. *Déterminer les diamètres à donner aux deux portions d'une conduite recevant l'eau par ses deux extrémités* A *et* G (fig. 36), *et alimentant sur son parcours différents écoulements* B, C, D, E, F, *de débits déterminés.*

Fig. 36.



Dans ce cas, des écoulements sont alimentés par l'eau venant de A, et les autres par l'eau venant de G, et généralement un des écoulements reçoit une partie de son eau de l'extrémité A et l'autre partie de l'extrémité G; ainsi, par exemple, la quantité d'eau fournie par l'extrémité A

est égale à la dépense des écoulements B, C, $\frac{1}{4}$ D, et celle fournie par l'extrémité G, à la dépense des écoulements F, E, $\frac{3}{4}$ D.

Le diamètre de chacune des parties AD et DG de la conduite doit être tel, que la charge à l'entrée de chaque branchement soit suffisante pour le débit de ce branchement, et, de plus, que la charge soit la même à l'entrée du branchement D pour chacune des portions de la conduite. On est donc obligé de procéder par tâtonnement pour arriver à la solution du problème. Pour cela, on assigne une première valeur à chacun des diamètres de AD et DG, et l'on détermine, en opérant comme dans le cas précédent (190), quelle est la charge à l'entrée de l'écoulement D. Si cette charge est la même pour les deux écoulements en sens contraires, et que la distribution se fasse convenablement par tous les branchements alimentés par chaque portion de la conduite principale, on adopte les diamètres supposés. Si, au contraire, ces conditions ne sont pas remplies, on augmente ou l'on diminue un ou les deux diamètres, selon que l'indiquent les résultats trouvés, et l'on continue le tâtonnement jusqu'à ce qu'on arrive à des diamètres satisfaisant aux conditions exigées.

192. 5° PROBLÈME. *Distribution d'eau au moyen d'une conduite de différents diamètres.*

Une telle distribution se compose d'une suite de conduites de diamètres différents, mais uniformes entre deux écoulements successifs, entre lesquels aussi le débit est constant. On résoudra donc ce problème d'après la marche suivie au n° 190, en déterminant la perte de charge due à chaque conduite partielle en ayant égard, non seulement à la diminution du débit, mais aussi à celle du diamètre. De là, on conclura la charge effective à l'origine de chaque branchement, charge qui devra être suffisante pour produire un écoulement convenable dans chacun d'eux.

193. 6° PROBLÈME. *Une conduite* AB (fig. 37) *est alimentée à son extrémité* A *par deux conduites* CA *et* DA *de débits donnés; il s'agit de déterminer les diamètres de ces conduites.*

Fig. 37.

On assigne une valeur au diamètre de AB; le débit de cette partie de la conduite étant donné, on obtient, au moyen de la table du n° 187, la perte de charge qui lui est due, et de la différence de niveau des points A et B on conclut quelle devra être la charge effective au point A. Assignant ensuite des valeurs aux diamètres des conduites CA et DA, comme on connaît le volume d'eau que doit amener chacune de ces conduites, au moyen de la table, on obtient la perte de charge pour chacune d'elles, et l'on en conclut la charge effective au point A; charge qui doit être la même pour les deux conduites, et égale à celle qui a été calculée nécessaire pour produire un

écoulement satisfaisant dans AB; s'il n'en était pas ainsi, on modifierait convenablement le diamètre d'une, ou de deux, ou même des trois conduites partielles.

Si la quantité d'eau fournie par chacune des conduites CA et DA n'était pas déterminée, on pourrait faire varier, outre les diamètres des conduites, les quantités d'eau fournies, mais de manière que la somme de ces quantités fût égale à la dépense de AB. Dans tous les cas, la charge au point A doit être la même pour chacune des conduites CA et DA, et suffisante pour produire un écoulement convenable dans la partie AB.

194. Applications de la table du n° 187 à des conduites de grands diamètres dépassant la limite de ladite table. On a (n° 184) les formules suivantes :

$$\frac{DJ}{4} = ab + bv^2, \tag{A}$$

la dépense Q par seconde :

$$Q = Sv = \frac{\pi D^2}{4}; \tag{B}$$

d'où :

$$J = 4\left(\frac{ab + bv^2}{D}\right).$$

Ainsi pour deux conduites de diamètres différents dans lesquelles la vitesse v de l'eau est la même :

1° *La charge J par mètre de longueur est en raison inverse du diamètre;*

2° *La dépense ou le débit par seconde est proportionnel à la section de la conduite ou au carré du diamètre.*

Ces lois de proportionnalité permettent d'appliquer la table du n° 187 à un diamètre dépassant la limite de cette table.

1er Exemple. *Soit à déterminer le débit d'une conduite de* 5 000 *mètres de longueur ayant* $1^m,20$ *de diamètre, la charge totale étant de* 5 *mètres?*

La charge par mètre est :

$$J = \frac{5^m}{5000} = 0^m,001.$$

Le diamètre $1^m,20$ dépassant la limite de la table du n° 187, on pourra, en s'appuyant sur la proportionnalité ci-dessus, procéder de la manière suivante : on considérera une autre conduite dont le diamètre serait moitié ou $0^m,60$ et pour laquelle la charge par mètre serait double de celle ci-dessus ou de $0^m,002$. Cela étant, on cherchera parmi les conduites de $0^m,60$ de diamètre, celle pour laquelle la pente par mètre se rapprochera le plus de $0^m,002$. On trouve (au bas de la page 169) la pente 0,001 984 59, répondant à la dépense 254,4696 (litres) par seconde avec la vitesse $0^m,90$. On en conclura, d'après la loi de proportionnalité ci-dessus que pour la même vitesse, la conduite de $1^m,20$ donnera une dépense quadruple, c'est-à-dire de 1 017 litres environ avec la charge

de $0^m,001$ par mètre. Ce résultat est suffisamment approximatif; mais il serait facile d'interpoler les valeurs du tableau de manière à obtenir exactement la dépense répondant à la charge exacte de 0,002 par mètre.

2° **Exemple.** *Soit à déterminer le diamètre d'une conduite, longue de 5 000 mètres, pouvant fournir 720 mètres cubes d'eau par heure, la charge totale étant de 5 mètres?*

La charge par mètre est de $0^m,001$. On constatera facilement (bas de la page 169) que pour la charge $0^m,001\,056$ (s'approchant de $0^m,001$) la dépense correspondante 183,7836 (litres) est inférieure à la dépense imposée 200 litres par seconde. Par conséquent le diamètre $0^m,60$ serait insuffisant. Cela étant, on fera usage de la loi de proportionnalité (194) en considérant une conduite dont le diamètre serait moitié de celui de la conduite cherchée ou dont le débit par seconde serait le quart de 200 litres ou de 50 litres, et pour laquelle la charge par mètre de longueur serait le double de $0^m,001$ ou de $0^m,002$. La table fera connaître le diamètre de cette *conduite auxiliaire*, et le double de ce diamètre sera celui de la conduite satisfaisant à l'énoncé.

On cherchera donc la conduite pour laquelle la charge par mètre se rapproche de $0^m,002$ et dont la dépensé se rapproche de 50 litres par seconde. On trouve (page 163) que la pression $0^m,001\,98$ (très près de $0^m,002$), correspondant à une dépense de $52^{lit},2762$, répond à un diamètre de $0^m,32$, avec une vitesse de $0^m,65$.

On en conclura que le diamètre cherché sera très approximativement le double de celui-ci ou de $0^m,64$, la vitesse étant la même, c'est-à-dire de $0^m,65$ par seconde. Le débit de 200 litres sera ainsi assuré et sera même dépassé. D'ailleurs, ayant ainsi une solution approchée, il sera facile de contrôler cette solution au moyen de la formule (A) de de Prony (n° 184).

3° **Exemple.** *Soit à calculer le débit d'une conduite de* $1^m,30$ *de diamètre de* 5 000 *mètres de longueur présentant une charge totale de* 5 *mètres?*

Le diamètre $1^m,30$ dépassant la limite de la table (n° 187) et aussi le double de cette limite qui est $0^m,65$, on pourra comparer la conduite proposée à une conduite quelconque de la table, par exemple, à une conduite de $0^m,50$ de diamètre, en observant les lois de proportionnalité énoncées n° 194. Ainsi pour la même vitesse de débit deux conduites, l'une de $1^m,30$ de diamètre et l'autre de $0^m,50$, donnent des dépenses Q et Q' qui sont dans le rapport des carrés de ces mêmes diamètres; on a donc :

$$\frac{Q}{Q'} = \frac{(1 \cdot 3)^2}{(0 \cdot 5)^2} = 6,76,$$

d'où :

$$Q = Q' \times 6,76.$$

D'autre part, pour la même vitesse, les charges J et J' par mètre sont inversement proportionnelles aux diamètres des conduites. On a donc :

$$\frac{J'}{J} = \frac{1^m,3}{0^m,5} = 2,6,$$

d'où :

$$J' = J \times 2,6 = 0^m,001 \times 2,6 = 0^m,0026.$$

Ainsi la pente J par mètre de la conduite de 1^m,30 étant de 0^m,001, celle de la conduite auxiliaire de 0^m,50 est de 0^m,0026.

Cela étant, on cherchera dans la table (n° 187), parmi les conduites de 0^m,50 de diamètre, celle dont la charge par mètre se rapproche le plus de 0^m,0026. On trouve (page 173) que la conduite de 0^m,50 serait comprise entre deux autres, donnant :

Vitesses.	Dépenses par seconde.	Charges par mètre.
0^m,90	176^l,7150	0^m,002 381 50
0^m,95	186^l,5325	0^m,002 646 15

En admettant que les différences des dépenses sont sensiblement proportionnelles aux différences des charges par mètre, le calcul donne pour la dépense par seconde, correspondant à la charge 0^m,0026 :

$$Q' = 184 \text{ litres environ,}$$

avec une vitesse de 0^m,94 par seconde.

On en conclut que la dépense de la conduite de 1^m,30 de diamètre, avec la même vitesse de débit, sera :

$$Q = 184 \times 6,76 = 1\,243 \text{ litres environ.}$$

On pourra contrôler ce résultat en appliquant la formule (A) de de Prony (184).

195. Recherches expérimentales relatives au mouvement de l'eau dans les tuyaux (par H. Darcy, inspecteur des ponts et chaussées, ouvrage publié en 1857). Darcy, en se plaçant dans les conditions mêmes du service des eaux, a exécuté sur une grande échelle des expériences dans le but de vérifier le degré d'exactitude et la généralité de la formule de de Prony (184), qui s'était souvent trouvée en défaut: ainsi d'Aubuisson a constaté, à Toulouse, qu'elle donnait une perte de charge J due au frottement qui n'atteignait pas parfois la moitié de la perte réelle, pour des conduites de grandes dimensions en service depuis plusieurs années. Cela est dû à ce que cette formule ne tient compte ni de l'influence de l'état de la surface intérieure des conduites, ni de leur diamètre.

Darcy a soumis à l'expérience des tuyaux en fer étiré, en plomb étiré, en fer bitumé et en verre neuf, sans dépôt, ainsi que des tuyaux en fonte, les uns neufs et les autres altérés par des dépôts, non nettoyés et ensuite nettoyés. Les di amètres ont varié depuis les plus petits jusqu'à 0^m,50, et les vitesses moyennes depuis 0^m,03 jusqu'à 5 ou 6 mètres, ce qui dépasse de beaucoup les vitesses usitées dans la pratique (186).

De ses expériences, au nombre de 198, Darcy conclut :

1° Que contrairement à ce qui était admis, la nature et l'état des surfaces exercent une influence notable sur le débit de la conduite. Ainsi :

Des conduites en fer enduites de bitume donnent des débits qui sont à ceux fournis par la formule de de Prony dans le rapport de 4 à 3 environ (184);

Le verre donne des résultats analogues;

Des conduites en fonte, dont des dépôts, même légers, ne diminuent le diamètre que d'une faible quantité, fournissent des débits notablement inférieurs à ce qu'indique la formule de de Prony. Après le nettoyage de ces mêmes conduites, les débits sont d'accord avec cette formule;

Des conduites en plomb de $0^m,014$, $0^m,027$ et $0^m,041$ de diamètre ont donné à l'expérience des débits indiqués par la formule de de Prony.

2° Que la formule de de Prony n'assigne pas une assez grande influence au diamètre de la conduite.

Pour les petits diamètres les résultats de l'expérience sont inférieurs à ceux de la formule, tandis que pour les grands diamètres ils leur sont supérieurs.

3° Que représentant graphiquement les résultats des diverses séries d'expériences, ainsi que l'avait fait de Prony, la loi de la résistance pour chaque tuyau est, en conservant aux lettres les mêmes significations qu'au n° 184, exprimée par la formule :

$$\frac{DJ}{2} = a'v + b'v^2; \qquad (1)$$

excepté cependant pour les tuyaux de très petits diamètres, et aussi pour les vitesses inférieures à $0^m,10$, pour lesquelles le terme $b'v^2$ a si peu d'influence, que la résistance est sensiblement proportionnelle à la simple vitesse v.

4° Que pour des tuyaux qui diffèrent, soit par leur nature, soit par leur diamètre, les coefficients a' et b' des deux puissances de la vitesse varient avec le degré de poli des surfaces et avec le diamètre.

5° Que pour des tuyaux recouverts de dépôts, la résistance peut, comme antérieurement l'avaient supposé Girard et admis d'Aubuisson, être considérée comme simplement proportionnelle au carré de la vitesse, ce qui donne :

$$\frac{DJ}{2} = b_1v^2. \qquad (2)$$

6° Que la pression est sans influence sur la résistance.

7° Que pour *chaque tuyau* et *chaque diamètre*, dès que la vitesse atteint quelques décimètres, la formule (2) reproduit les résultats de l'expérience avec une exactitude qui est sensiblement la même que pour la formule (1), et que c'est surtout pour les tuyaux recouverts d'une couche de dépôts, et par conséquent à l'état normal des conduites d'eau, que cette coïncidence se manifeste.

8° Que selon que la conduite est en tôle enduite de bitume, ou en fonte neuve, ou en fonte recouverte de dépôts, les valeurs de b_1 et par suite aussi celles de J sont à peu près, pour le même diamètre ou des diamètres sensiblement égaux, dans le rapport des nombres 1, 1.5 et 3.

9° Que pour des tuyaux en fer étiré et en fonte, sensiblement au même degré de poli, et dont les diamètres ont varié de $0^m,0122$ à $0^m,50$, les valeurs du coefficient b_1 peuvent être représentées par la formule :

$$b_1 = 0,000507 + \frac{0,00001294}{D}.$$

C'est à l'aide de cette formule que Darcy a calculé les valeurs de b_1 du tableau suivant.

De la formule (2) on tire :

$$D = \frac{2b_1v_2}{J}, \quad J = \frac{2b_1v^2}{D}, \quad v = \sqrt{\frac{JD}{2b_1}}.$$

Ayant : $$Q = \frac{\pi D^2}{4} v \quad \text{ou} \quad v = 1{,}273 \frac{Q}{D^2},$$

on a aussi :

$$Q = \frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{JD^5}{2b_1}}, \quad D = \sqrt[5]{\frac{32}{\pi^2} b_1 \frac{Q^2}{J}} = \sqrt[5]{3{,}2423 b_1 \frac{Q^2}{J}}, \quad J = 3{,}2423 \frac{b_1}{D^5} Q^2.$$

Ces formules sont applicables aux tuyaux neufs en fonte et en fer étiré; pour les tuyaux en tôle, enduite de bitume, ou en verre dont la surface est polie, il suffit d'y multiplier b_1 par 0,67 (8°); pour ceux en fonte recouverts de dépôts, on doit doubler b_1, ce qui donne :

$$Q = \frac{\pi}{8} \sqrt{\frac{JD^5}{b_1}}, \quad D = \sqrt[5]{6{,}4846 b_1 \frac{Q^2}{J}}, \quad J = 6{,}4846 \frac{b_1}{D^5} Q^2.$$

A moins qu'il ne s'agisse de conduites provisoires, c'est-à-dire de peu de durée, il est prudent d'adopter ces dernières formules, quels que soient le degré de poli de la surface et la matière employée; car après quelque temps de service, surtout si les eaux sont ferrugineuses et à plus forte raison calcaires, les parois intérieures sont couvertes de dépôts, et toutes les conduites amenées dans le même état que celles de fonte en service permanent.

Représentant $6{,}4846 \frac{b_1}{D^5}$ par α, la dernière formule devient :

$$J = \alpha Q^2, \quad \alpha = \frac{J}{Q^2}, \quad Q = \sqrt{\frac{J}{\alpha}}. \qquad (a)$$

Le tableau suivant contient les valeurs de b_1 et celles de α pour les différents diamètres de conduite. Pour des conduites provisoires en fonte neuve ou en fer étiré, il suffirait de diviser par 2 les valeurs de α du tableau pour faire usage des formules (a); et pour des conduites neuves en tôle bitumée ou en verre, il suffirait de diviser par 3 les valeurs de α (8°).

DIAMÈTRES D.	VALEURS de b_1.	VALEURS de α.	DIAMÈTRES D.	VALEURS de b_1.	VALEURS de α.	DIAMÈTRES D.	VALEURS de b_1.	VALEURS de α.
m.			m.			m.		
0,01	0,001 801	116 790 000	0,18	0,000 578	19,836	0,39	0,000 540	0,388 11
0,02	0,001 154	2 338 500	0,19	0,000 575	15,059	0,40	0,000 539	0,341 34
0,027	0,000 986	445 600	0,20	0,000 571	11,571	0,41	0,000 538	0,301 12
0,03	0,000 938	250 310	0,21	0,000 568	9,018 5	0,42	0,000 537	0,266 45
0,04	0,000 830	52 561	0,216	0,000 566	7,806 1	0,43	0,000 537	0,236 87
0,05	0,000 765	15 874	0,22	0,000 565	7,109 2	0,44	0,000 536	0,210 76
0,054	0,000 746	10 535	0,23	0,000 563	5,672 2	0,45	0,000 535	0,188 01
0,06	0,000 722	6 020,9	0,24	0,000 560	4,561 0	0,46	0,000 535	0,168 44
0,07	0,000 691	2 666,1	0,25	0,000 558	3,705 2	0,47	0,000 534	0,150 99
0,08	0,000 668	1 321,9	0,26	0,000 556	3,034 5	0,48	0,000 533	0,135 65
0,081	0,000 666	1 238,6	0,27	0,000 554	2,503 6	0,49	0,000 533	0,122 36
0,09	0,000 650	713,81	0,28	0,000 553	2,083 6	0,50	0,000 532	0,110 39
0,10	0,000 636	412,42	0,29	0,000 551	1,742 0	0,55	0,000 530	0,068 288
0,108	0,000 626	276,27	0,30	0,000 550	1,467 7	0,60	0,000 528	0,044 031
0,11	0,000 624	251,25	0,31	0,000 548	1,241 2	0,65	0,000 526	0,029 397
0,12	0,000 614	160,01	0,32	0,000 547	1,057 1	0,70	0,000 525	0,020 256
0,13	0,000 606	105,84	0,325	0,000 546	0,976 47	0,75	0,000 524	0,014 319
0,135	0,000 602	87,058	0,33	0,000 546	0,904 70	0,80	0,000 523	0,010 350
0,14	0,000 599	72,222	0,34	0,000 545	0,777 83	0,85	0,000 522	0,007 6289
0,15	0,000 593	50,639	0,35	0,000 543	0,670 42	0,90	0,000 521	0,005 7215
0,16	0,000 587	36,301	0,36	0,000 542	0,581 26	0,95	0,000 520	0,003 4615
0,162	0,000 586	34,057	0,37	0,000 541	0,505 91	1,00	0,000 519	0,003 3655
0,17	0,000 583	26,626	0,38	0,000 541	0,442 75			

196. Soit à résoudre, à l'aide des formules et du tableau du numéro précédent, les problèmes des n[os] 188 et suivants.

1[er] PROBLÈME (188). *Soit à déterminer le diamètre d'une conduite de* 5000 *mètres de longueur, capable de débiter* 60 *mètres cubes d'eau par heure, ou* 0[mc],016667 *par seconde, la charge totale étant de* 5 *mètres, c'est-à-dire* 0[m],001 *par mètre de longueur de conduite.*

La formule (a) donne :

$$\alpha = \frac{J}{Q^2} = \frac{0{,}001}{0{,}016667^2} = 3{,}5999.$$

En consultant le tableau précédent, on voit que le diamètre cherché est compris entre 0[m],25 et 0[m],26, et de peu supérieur à 0[m],25.

Si l'on veut avoir à très peu près sa valeur exacte, on suppose qu'entre les deux diamètres successifs 0[m],25 et 0[m],26 de la table, les variations des diamètres sont proportionnelles à celles de α, et en représentant par x ce qu'il faut ajouter à 0[m],25, on a :

$$(3{,}7052 - 3{,}0345) : (3{,}7052 - 3{,}5999) :: (0{,}26 - 0{,}25) : x;$$

d'où :

$$x = \frac{0{,}01 \times 0{,}1053}{0{,}6707} = 0{,}0016.$$

On a donc D = 0[m],252, au lieu de D = 0[m],24 que nous avons trouvé au n° 188, d'après la formule de de Prony.

Si la conduite était en fonte neuve, et ne devait servir que pendant un temps assez court, on aurait :

$$\frac{\alpha}{2} = \frac{J}{Q^2} \quad \text{ou} \quad \alpha = \frac{2J}{Q^2} = 3{,}5999 \times 2 = 7{,}1998,$$

valeur de α qui correspond à D = 0[m],220 environ.

Si la conduite était en tôle bitumée et provisoire, on aurait :

$$\alpha = \frac{3J}{Q^2} = 3,5999 \times 3 = 10,7997 \quad \text{et} \quad D = 0^m,203.$$

2e **Problème.** Soit à résoudre le problème du n° 189.

Pour le diamètre $D = 0^m,09$, on a :

$$J = \alpha Q^2 = 713,81 \times 0,016667^2 = 0^m,19829.$$

La perte de charge pour les 1000 mètres de longueur de conduite est alors $198^m,29$; la charge totale due au mouvement de l'eau et son élévation, $198^m,29 + 25^m$; le travail total à produire par heure, non compris le frottement des pompes, $60000\,(198,29 + 25) = 13397400^{km}$; enfin, la force de la machine, $\frac{13397400}{270000} = 49,62$ chevaux.

Opérant de même pour les diamètres successifs $0^m,12$, $0^m,15$, $0^m,20$, $0^m,25$, on obtient les résultats du tableau suivant.

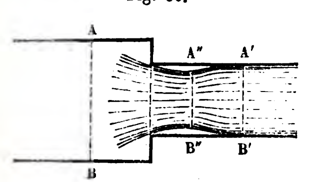
DIAMÈTRE de la conduite.	CHARGE J par mètre.	CHARGE TOTALE due au mouvement de l'eau et à son élévation.	EFFET UTILE de la machine en kilogrammètres par heure.	FORCE de la machine en chevaux.
m.	m.	m.		
0,09	0,19829	198,29 + 25 = 223,29	13397400	49,62
0,12	0,04445	44,45 + 25 = 69,45	4167000	15,43
0,15	0,01407	14,07 + 25 = 39,07	2344020	8,68
0,20	0,00321	3,21 + 25 = 28,21	1692858	6,27
0,25	0,00103	1,03 + 25 = 26,03	1561800	5,78

En comparant les valeurs de J de ce tableau avec celles du n° 189, qui correspondent aux mêmes vitesses, on voit que la formule de de Prony donne des pertes de charge beaucoup plus petites que celle de Darcy. Il n'en serait pas de même pour les conduites neuves provisoires en fonte, et surtout pour celles en tôle bitumée, puisqu'il faudrait diviser par 2 les valeurs de J du tableau précédent pour les premières, et par 3 pour les secondes (195).

En faisant usage de la formule de Darcy, on résoudra les problèmes des nos 190 à 193, en suivant la marche indiquée à ces numéros.

197. **Perte de charge due aux changements brusques du diamètre d'une conduite, et aux branchements.**

Fig. 38.



1° Pour une diminution brusque du diamètre de la conduite, la charge à l'origine A′B′ du petit tuyau est égale à la charge en AB, fin du grand tuyau, moins une perte :

$$p = 0,49\,\frac{v^2}{2g}.$$

v vitesse de l'eau en A'B'; elle est égale au débit Q divisé par la section s de la conduite en A'B', et elle est reliée à la vitesse V en AB par la relation $vs = VS$, S étant la section en AB.

La valeur précédente de p s'applique notamment à l'entrée de l'eau d'un réservoir dans une conduite, à moins que cette conduite ne prenne naissance à la paroi intérieure du réservoir par la forme évasée qu'affecte la veine en se contractant.

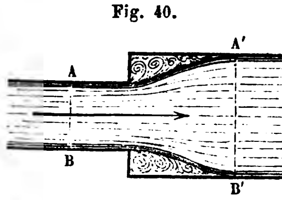
Fig. 39.

2° Si l'eau passe du grand tuyau dans le petit par un orifice en mince paroi ouvert dans un diaphragme, comme cela a lieu, par exemple, pour un robinet-vanne, la perte de charge est :

$$p = \frac{v_2}{2g}\left(\frac{s}{ks'} - 1\right)^2.$$

v et s vitesse de l'eau et section en A'B', comme au 1°;
s' aire de l'orifice d'écoulement MN.
k coefficient de la dépense, qu'on suppose être le même que si l'écoulement avait lieu dans l'air, et par suite égal à 0,62 en moyenne (140).

Fig. 40.



3° Si le diamètre augmente brusquement, la perte de charge est :

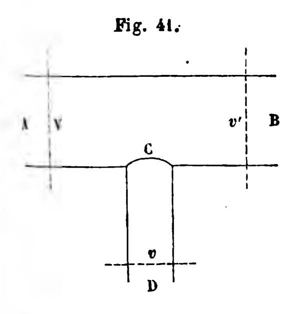
$$p = \frac{(V - v)^2}{2g}.$$

V et v vitesses de l'eau en AB et A'B'.

Lorsque l'eau passe du tuyau AB dans un réservoir d'arrivée, la vitesse v peut être considérée comme nulle, et la formule précédente devient :

$$p = \frac{V^2}{2g}.$$

Fig. 41.



4° Pour le branchement à angle vif que fait un tuyau CD sur une conduite principale AB, une expérience piézométrique seule peut donner la perte de charge et les variations des pressions dans les sections A, B et D. Lorsque le tuyau CD est à angle droit sur celui AB, on admet, d'après un petit nombre d'expériences peu précises, que le niveau piézométrique en D est inférieur au niveau piézométrique en A, de trois fois la hauteur due à la vitesse v de l'eau dans le petit tuyau $\left(\text{soit de } \frac{3v^2}{2g}\right)$, et que les pressions en A et B, dans le grand tuyau, sont sensiblement les mêmes. A mesure que

l'angle fait par CD avec AB devient plus petit, la perte précédente diminue de plus en plus, et, dans la pratique, on évite les branchements à angles vifs, afin que les trajectoires des filets liquides soient déviés le plus lentement possible. On n'a plus alors d'autre perte de charge que celle qui peut résulter des changements brusques de vitesse provenant du passage de l'eau du tuyau A dans les tuyaux B et C. Ainsi pour ces tuyaux, les pertes de charge deviennent respectivement :

Fig. 42.

$$\frac{(V - v)^2}{2g} \quad \text{et} \quad \frac{(V - v')^2}{2g}.$$

Remarque. Dans la pratique des distributions d'eau, les pertes de charge pour variations brusques de diamètres et pour branchements peuvent en général être négligées vis-à-vis des pertes de charge dues au frottement de l'eau dans les conduites.

198. **Perte de charge due aux coudes.** Navier, de la discussion de résultats empiriques donnés par Dubuat, a déduit la formule :

$$p = \frac{v^2}{2g}\left(0{,}0039 + 0{,}0186r\right)\frac{a}{r^2}.$$

p perte de charge due au coude;
v vitesse moyenne de l'eau dans le tuyau;
$\frac{v^2}{2g}$ hauteur correspondant à la vitesse v (133);
r rayon de l'arc formé par l'axe du coude;
a développement de l'arc formé par l'axe du coude.

D'après cette formule, la perte de charge p serait proportionnelle au carré de la vitesse moyenne v et à la longueur de l'arc a; elle serait fonction du rayon r, et, ce qu'il est difficile d'admettre comme entièrement rigoureux, indépendante du diamètre du tuyau; enfin elle serait d'autant plus petite que r serait plus grand.

Pour les diamètres de conduite successifs :

$0^m{,}05$ et $0^m{,}06$, $0^m{,}08$ et $0^m{,}10$, $0^m{,}15$, $0^m{,}20$, $0^m{,}25$, $0^m{,}30$,

les valeurs de r sont respectivement :

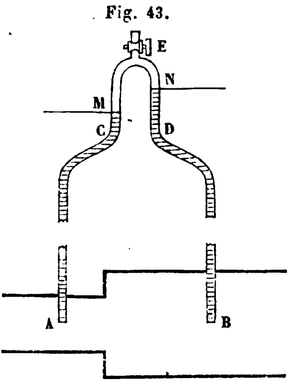
$0^m{,}45$, $0^m{,}50$, $0^m{,}75$, $1^m{,}00$, $1^m{,}50$, $2^m{,}00$.

Avec ces proportions, la perte de charge due aux coudes est très faible comparée à celle due au frottement de l'eau contre les parois des tuyaux, et comme dans la pratique les coudes sont généralement en petit nombre, on peut ordinairement négliger leur influence sur la perte de charge.

199. Le **piézomètre différentiel**, imaginé par Belanger, pour mesurer les différences, en général très faibles, des pressions, qui peuvent être

très fortes, en deux points voisins d'une conduite, permet de déterminer la perte de charge due à un changement brusque du diamètre d'une conduite, à un branchement, à un coude, etc. (197 et 198). Deux tubes implantés en A et B dans la conduite sont réunis à leur partie supérieure par un tube recourbé CED, en verre, au sommet duquel est pratiquée une ouverture E munie d'un robinet. L'eau monte dans le piézomètre et comprime l'air qui y est contenu. On ouvre avec précaution le robinet E, de manière à laisser écouler une partie de cet air, et faire monter les niveaux M et N du liquide jusque dans le tube en verre. La différence de hauteur des niveaux M et N, qu'on lit sur une échelle, est la différence, évaluée en hauteur d'eau, des pressions aux points A et B de l'intérieur de la conduite, et, par suite, la perte de charge que subit la veine liquide par son passage de B en A.

Fig. 43.



200. Pouce d'eau ou pouce de fontainier. On évalue quelquefois le débit d'une conduite d'eau en pouce d'eau ou pouce de fontainier, qui équivaut à un débit de $0^{mc},000222166$ par seconde, ou d'environ $13^{lit},33$ par minute, ou encore $19^{mc},1953$ par 24 heures.

La *ligne d'eau* est la 144ᵉ partie du pouce d'eau, ou $133^{lit},3$ par 24 heures, et le *point d'eau*, la 144ᵉ partie de la ligne d'eau.

201. Borne-fontaine. Une borne-fontaine débite moyennement à Paris $0^{mc},00178$ par seconde, ce qui équivaut à peu près à 8 pouces de fontainier, ou 107 litres par minute. Son orifice est placé à $0^{m},50$ au-dessus du sol, et il suffit, pour son alimentation, que l'eau puisse s'élever de quelques décimètres au-dessus de cet orifice. Les bornes-fontaines sont espacées de 150 mètres.

A Dijon, le débit par minute des bornes-fontaines varie de 74 litres sous une charge de $2^{m},078$, à 264 litres sous la charge de $17^{m},001$, et le produit ordinaire est de 200 litres. Ce débit alimente et au delà une pompe à incendie qui lance, dans une marche continue, jusqu'à 235 litres par minute, ou seulement 170 litres environ, à cause des temps d'arrêt inévitables. La distance des bornes est de 100 mètres dans l'intérieur de la ville, et, y compris les faubourgs, la distance moyenne est de 150 mètres.

202. Proportions des tuyaux de conduite : formules. L'épaisseur à donner à un tuyau cylindrique soumis à une certaine pression intérieure est donnée par la formule :

$$e = \frac{hD}{2R}.$$

e épaisseur du tuyau en millimètres ;
h pression intérieure du tuyau, exprimée en mètres de hauteur d'eau ;

D diamètre du tuyau en mètres;
R résistance à la traction de la matière dont est composé le tuyau, en kilogrammes par millimètre carré de section.

Pour la fonte, la résistance absolue à la traction varie de 12 à 14 kilogr. par millimètre carré de section; mais, dans la pratique, il convient, pour la stabilité des constructions, de réduire la traction à 3 et même à 2 kilogr. Adoptant 2 kilogr. dans le cas des tuyaux de conduite, la formule précédente devient :

$$e = \frac{hD}{4} = 025hD,$$

et si l'on exprime e en mètres, on a :

$$e = 0{,}000\,25hD.$$

Cette formule donne encore des épaisseurs inférieures à celles adoptées dans la pratique; cela tient à la difficulté d'obtenir sans défaut des tuyaux en fonte de $1^m,50$, de $2^m,50$ et plus de longueur.

Pratiquement, les épaisseurs des tuyaux se déterminent à l'aide des valeurs suivantes :

Fonte { coulée horizontalement	$e = 0^m,010 + 0,00200Dn$
Fonte { coulée verticalement	$e = 0\ ,008 + 0,00160Dn$
Fer	$e = 0\ ,003 + 0,00086Dn$
Cuivre laminé	$e = 0\ ,004 + 0,00147Dn$
Plomb	$e = 0\ ,005 + 0,00242Dn$
Zinc	$e = 0\ ,004 + 0,00620Dn$
Bois	$e = 0\ ,027 + 0,03230Dn$
Pierres naturelles	$e = 0\ ,030 + 0,00363Dn$
Pierres factices (béton comprimé)	$e = 0\ ,040 + 0,00538Dn$

Les tuyaux en terre sont à base d'ardoise, et leur épaisseur e varie de $0^m,020$ à $0^m,030$.

e épaisseur du tuyau en mètres;
D diamètre du tuyau en mètres;
n pression à laquelle on essaye les tuyaux, en atmosphères.

Pour $n = 10$, on a pour les tuyaux en fonte coulés horizontalement :

$$e = 0^m,01 + 0,02D.$$

C'est à l'aide de cette formule qu'on détermine les épaisseurs des tuyaux. On essaye les tuyaux à une pression de 10 atmosphères. La pression d'essai est ordinairement 5 fois plus grande que la pression à laquelle les tuyaux seront soumis en service.

Aujourd'hui, on coule les tuyaux debout. Avec cette précaution, on peut diminuer leur épaisseur, en faisant $n = 10$, à l'aide de la formule :

$$e = 0^m,008 + 0,016D.$$

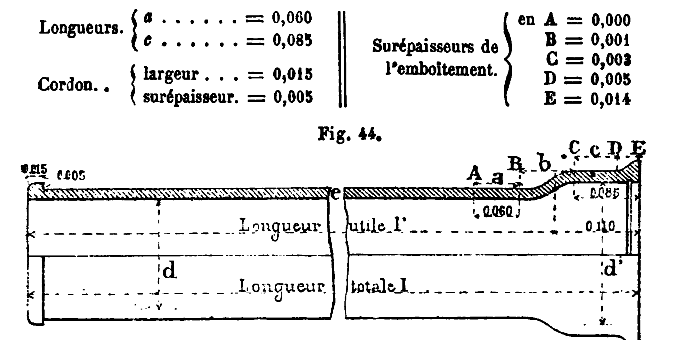
Les différents tuyaux, dont les dimensions sont données dans les tableaux suivants, sont en fonte.

203. *Tuyaux à emboitement ou manchon et cordon* (voir pages 203 et 208).

Dimensions invariables :

Longueurs.	*a* . . . . = 0,060 *c* . . . . = 0,085	Surépaisseurs de l'emboitement.	en A = 0,000 B = 0,001 C = 0,003 D = 0,005 E = 0,014
Cordon. .	largeur . . . = 0,015 surépaisseur. = 0,005		

Fig. 44.



La garniture des assemblages à manchons se fait au moyen de plomb et d'étoupes.

DIAMÈTRE intérieur (*d*).	LONGUEUR totale (*l*).	LONGUEUR utile (*l'*).	ÉPAISSEUR du fût (*e*).	DIAMÈTRE intérieur de l'emboitement (*d'*).	LONGUEUR de BC (*b*).	ÉPAISSEUR du joint.	POIDS du tuyau.
m.	m.	m.	m.	m	m.	m.	k.
0,06	2,61	2,50	0,009	0,096	0,067	0,009	39,5
0,10	3,11	3,00	0,010	0,138	0,070	*id.*	81,0
0,15	*id.*	*id.*	0,0105	0,189	0,074	*id.*	122,5
0,20	*id.*	*id.*	0,011	0,240	0,077	*id.*	169,0
0,25	*id.*	*id.*	0,012	0,292	0,080	*id.*	226,0
0,30	4,11	4,00	0,013	0,346	0,083	0,010	387,0
0,35	*id.*	*id.*	0,014	0,398	0,086	*id.*	483,5
0,40	*id.*	*id.*	0,015	0,450	0,089	*id.*	600,0
0,50	*id.*	*id.*	0,016	0,552	0,095	*id.*	781,0
0,60	*id.*	*id.*	0,018	0,656	0,101	*id.*	1050,0
0,80	*id.*	*id.*	0,020	0,862	0,113	0,011	1508,0
1,00	*id.*	*id.*	0,022	1,068	0,125	0,012	2117,5
1,10	*id.*	*id.*	0,025	1,174	0,130	*id.*	2648,0

Ce tableau et les suivants sont extraits de l'*Album des types et tableaux des dimensions normales des tuyaux et pièces en fonte employés dans la canalisation de Paris.*

204. *Tuyaux cylindriques.*

DIAMÈTRE intérieur.	LONGUEUR totale.	ÉPAISSEUR	POIDS	DIAMÈTRE intérieur.	LONGUEUR totale.	ÉPAISSEUR	POIDS
m.	m.	m.	k.	m.	m.	m.	k.
0,06	2,50	0,009	35,0	0,40	4,10	0,014	537,5
0,10	3,10	0,009	69,0	0,50	*id.*	0,015	716,5
0,15	*id.*	0,010	112,5	0,60	*id.*	0,017	973,0
0,20	*id.*	0,010	147,5	0,80	*id.*	0,019	1443,5
0,25	*id.*	0,011	201,5	1,00	*id.*	0,021	1975,5
0,30	4,10	0,012	347,0	1,10	*id.*	0,024	2500,5
0,35	*id.*	0,013	437,5				

DIAMÈTRE intérieur du tuyau correspondant.	205. *Bagues droites* (voir pages 202 et 208). LARGEUR de la bague (l).	DIAMÈTRE minimum de la bague (d).	ÉPAISSEUR en m.	ÉPAISSEUR en n.	CONICITÉ $\frac{d'-d}{2}$	ÉPAISSEUR du joint.	POIDS de la bague.	206. *Bagues biaises.* DIAMÈTRE minimum de la bague (d).	LARGEUR maxima (l').	LARGEUR minima (l'').	ÉPAISSEUR en m'.	ÉPAISSEUR en n'.	RAYONS de courbure à l'intérieur.	ANGLE compris entre les deux faces.	POIDS de la bague.
m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.	k.	m.	m.	m.	m.	m.	m.		k.
0,06	0,08	0,090	0,018	0,011	0,002	0,006	2,7	»	»	»	»	»	»	»	»
0,10	*id.*	0,131	0,020	0,012	*id.*	0,00625	4,2	»	»	»	»	»	»	»	»
0,15	0,09	0,182	0,022	0,013	*id.*	*id.*	7,0	»	»	»	»	»	»	»	»
0,20	0,10	0,233	0,024	0,014	*id.*	*id.*	10,7	»	»	»	»	»	»	»	»
0,25	*id.*	0,285	0,025	0,015	0,0025	*id.*	13,5	0,294	0,150	0,100	0,035	0,020	0,745	9° 43′	23,5
0,30	*id.*	0,338	0,026	0,016	*id.*	0,00675	17,0	0,347	*id.*	*id.*	*id.*	*id.*	0,868	8° 16′	27,0
0,35	*id.*	0,390	0,028	0,018	*id.*	*id.*	21,5	0,399	*id.*	*id.*	0,037	0,022	0,998	7° 21′	32,0
0,40	*id.*	0,441	0,030	0,020	0,003	0,007	26,0	0,450	*id.*	*id.*	0,040	0,025	1,125	6° 22′	42,0
0,50	*id.*	0,544	0,032	0,022	*id.*	*id.*	34,5	0,554	*id.*	*id.*	0,045	*id.*	1,385	5° 10′	58,5
0,60	*id.*	0,648	0,034	0,024	*id.*	*id.*	39,5	0,658	*id.*	*id.*	0,048	0,028	1,645	4° 23′	75,0
0,80	0,12	0,854	0,042	0,027	*id.*	0,008	84,0	0,864	0,180	0,120	0,050	0,030	2,160	4° 7′	107,0
1,00	0,15	1,060	0,045	0,030	*id.*	0,009	137,5	1,070	0,220	0,150	0,055	0,035	2,565	4° 0′	194,5
1,10	*id.*	1,166	0,050	0,035	*id.*	*id.*	172,0	1,177	*id.*	*id.*	*id.*	*id.*	3,108	3° 25′	213,5

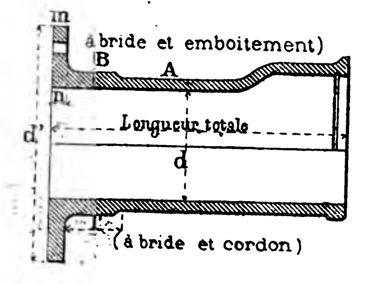
Fig. 45.

Fig. 46.

207. *Bouts d'extrémité.* — **Dimensions invariables :**

Longueur totale des bouts d'extrémité . . . . = 0m,40
Longueur l' . . . . = 0 ,08
Surépaisseur du tuyau en B. . . . . = 0 ,005

Fig. 47.



Nota. Le cordon et l'emboîtement sont les mêmes que ceux des tuyaux droits de même diamètre.

DIAMÈTRE intérieur des bouts d'extrémité (*d*).	ÉPAISSEUR du tuyau en A.	DIAMÈTRE extérieur de la bride (*d'*).	ÉPAISSEUR DE LA BRIDE		POIDS DES BOUTS D'EXTRÉMITÉ		
			en *n*.	en *m*.	à bride et cordon.	à bride et emboîtement.	à deux brides.
m.	m.	m.	m.	m.	kg.	kg.	kg.
0,06	0,009	0,210	0,020	0,017	10,0	12,5	14,0
0,10	0,010	0,250	0,022	0,019	17,0	20,0	23,5
0,15	0,0105	0,306	0,023	0,020	25,0	28,5	34,0
0,20	0,011	0,358	0,024	0,021	33,5	38,5	45,0
0,25	0,012	0,411	0,025	0,022	44,0	50,0	58,5
0,30	0,013	0,474	0,026	0,023	56,5	64,0	75,5
0,35	0,014	0,528	0,027	0,024	70,0	78,0	92,0
0,40	0,015	0,582	0,028	0,025	84,5	98,0	110,0
0,50	0,016	0,682	0,030	0,027	110,0	121,5	143,0
0,60	0,018	0,786	0,033	0,030	145,5	159,5	188,0
0,80	0,020	0,990	0,038	0,036	211,5	232,0	275,5
1,00	0,022	1,212	0,044	0,042	306,5	330,0	406,5
1,10	0,025	1,318	0,046	0,044	372,5	399,0	486,5

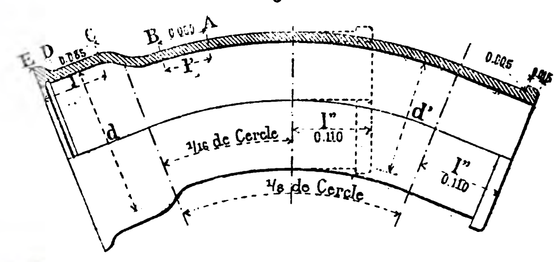
208. *Tuyaux courbes 1/8 et 1/16 de cercle, à emboîtement et cordon.*

Dimensions invariables :

Cordon. . . . { largeur . . . . = 0,015 ; surépaisseur. . = 0,005
Longueur de l. . . . . = 0,085
id. de l'. . . . . = 0,060
id. de l''. . . . . = 0,110

Surépaisseur de l'emboîtement. . . . . . { en A = 0,000 ; B = 0,001 ; C = 0,003 ; D = 0,005 ; E = 0,014

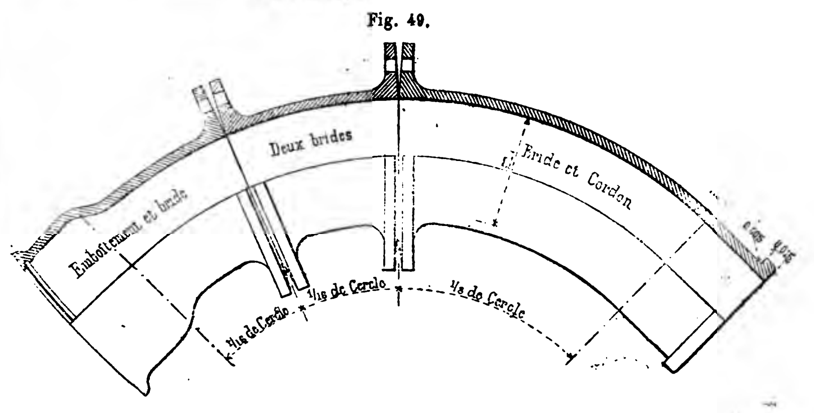
Fig. 48.



DIAMÈTRE intérieur du tuyau (d').	RAYON de courbure R.	ÉPAISSEUR (e).	DIAMÈTRE intérieur de l'emboîtement (d).	LONGUEUR de BC.	ÉPAISSEUR DU JOINT avec les tuyaux courbes.	ÉPAISSEUR DU JOINT avec le cordon des tuyaux droits.	ÉPAISSEUR DU JOINT avec l'emboîtement des tuyaux droits.	POIDS DES TUYAUX COURBES 1/8e de cercle.	POIDS DES TUYAUX COURBES 1/16e de cercle.
m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.	kg.	kg.
0,06	0,50	0,011	0,100	0,067	0,009	0,011	0,007	14,0	11,5
0,10	*id.*	0,012	0,142	0,070	*id.*	*id.*	*id.*	23,0	17,0
0,15	*id.*	0,0125	0,193	0,074	*id.*	*id.*	*id.*	33,5	24,5
0,20	*id.*	0,013	0,244	0,077	*id.*	*id.*	*id.*	44,5	32,5
0,25	0,50	0,014	0,296	0,080	*id.*	*id.*	*id.*	58,5	42,0
	1,50							134,0	75,0
0,30	0,50	0,015	0,352	0,083	0,010	0,013	*id.*	74,5	53,5
	1,50							165,5	95,5
0,35	1,50	0,016	0,404	0,086	*id.*	*id.*	*id.*	195,5	117,5
0,40	*id.*	0,017	0,455	0,089	*id.*	*id.*	*id.*	237,5	145,0
0,50	*id.*	0,019	0,558	0,095	*id.*	*id.*	*id.*	333,0	201,5
0,60	*id.*	0,021	0,662	0,101	*id.*	*id.*	*id.*	429,5	255,5
0,80	*id.*	0,024	0,868	0,113	*id.*	0,014	*id.*	648,0	384,5
1,00	2,00	0,027	1,074	0,125	*id.*	0,015	*id.*	1113,5	641,0
1,10	*id.*	0,030	1,180	0,130	*id.*	*id.*	*id.*	1412,0	802,5

209. *Tuyaux courbes 1/8 et 1/16* ***de cercle, à deux brides, à bride et emboitement, à bride et cordon.***

Fig. 49.



(Pour les assemblages à brides, voir pages 202 et 208.)

DIAMÈTRE intérieur du tuyau (*d*).	POIDS DES TUYAUX COURBES 1/8 DE CERCLE			POIDS DES TUYAUX COURBES 1/16 DE CERCLE.		
	à deux brides.	à bride et cordon.	à bride et emboîtement.	à deux brides.	à bride et cordon.	à bride et emboîtement.
m.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.
0,06	14,0	12,5	15,5	10,5	9,0	12,0
0,10	23,0	21,0	24,5	17,0	15,0	18,5
0,15	33,5	31,0	36,5	24,0	22,0	26,5
0,20	44,0	41,5	47,0	31,5	29,5	34,5
0,25	57,0	56,5	61,0	40,5	38,0	44,5
	122,0	120,0	126,5	73,5	71,0	77,5
0,30	74,0	70,0	78,0	52,5	49,0	57,0
	157,5	154,0	157,5	95,5	92,0	95,5
0,35	194,0	190,0	199,0	116,0	112,0	121,0
0,40	233,5	229,5	241,5	139,0	135,0	147,0
0,50	318,5	316,0	335,0	187,5	185,0	204,0
0,60	419,5	417,0	432,5	246,0	243,5	258,5
0,80	635,0	631,5	651,0	372,0	368,5	388,0
1,00	1 122,0	1 103,0	1201,0	648,5	629,0	661,0
1,10	1 401,5	1 389,0	1 502,0	799,5	787,0	816,0

NOTA. 1° Le rayon de courbure est le même que celui des tuyaux courbes à cordon et emboîtement du même diamètre;

2° L'épaisseur du tuyau est également la même;

3° Le cordon et l'emboîtement sont semblables à ceux des tuyaux courbes à emboîtement et cordon;

4° La bride est identique à celle des bouts d'extrémité du même diamètre.

210. *Manchons droits et courbes.*

Longueur invariable $l = 0^m,40$. Longueur invariable $l'' = 0^m,110$.

Fig. 50.

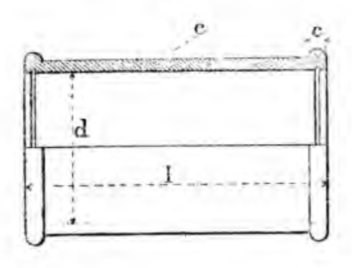
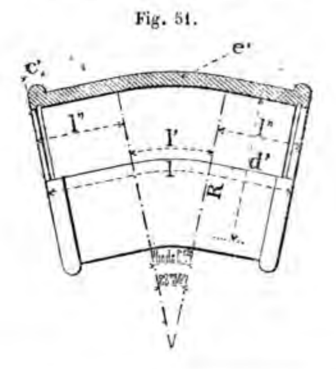


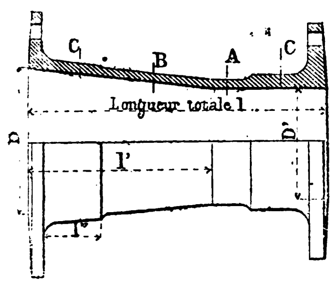
Fig. 51.



DIAMÈTRE INTÉRIEUR des tuyaux.	MANCHONS DROITS.					MANCHONS COURBES 1/16 DE CERCLE.							
	Diamètre intérieur (*d*).	Épaisseur (*e*).	Largeur du boudin ou cordon (*c*).	Épaisseur du joint.	Poids du manchon.	Diamètre intérieur (*d'*).	Épaisseur (*e'*).	Largeur du boudin ou cordon (*c'*).	Longueur de l'arc (*l'*).	Longueur totale du manchon sur l'axe (*l*).	Épaisseur du joint.	Rayon de courbure R.	Poids du manchon.
m.	m.	m.	m.	m.	kg.	m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.	kg.
0,06	0,100	0,013	0,020	0,011	14,2	0,100	0,013	0,020	0,098	0,318	0,011	0,250	11,5
0,10	0,142	0,014	*id.*	*id.*	21,0	0,142	0,014	*id.*	*id.*	*id.*	*id.*	*id.*	17,0
0,15	0,193	0,015	*id.*	*id.*	30,0	0,193	0,015	*id.*	*id.*	*id.*	*id.*	*id.*	24,0
0,20	0,244	0,016	*id.*	*id.*	39,5	0,244	0,016	*id.*	*id.*	*id.*	*id.*	*id.*	32,0
0,25	0,296	0,017	*id.*	*id.*	50,5	0,296	0,017	*id.*	*id.*	*id.*	*id.*	*id.*	40,5
0,30	0,350	0,018	*id.*	0,012	62,5	0,352	0,018	*id.*	0,100	0,320	0,013	*id.*	50,5
0,35	0,402	0,019	0,025	*id.*	77,5	0,404	0,019	0,025	0,110	0,330	*id.*	0,300	64,5
0,40	0,453	0,020	*id.*	*id.*	91,0	0,455	0,020	*id.*	0,120	0,340	*id.*	*id.*	78,0
0,50	0,556	0,021	0,027	*id.*	117,5	0,558	0,021	0,027	0,141	0,361	*id.*	0,350	106,5
0,60	0,660	0,022	0,030	*id.*	147,0	0,662	0,022	0,030	0,161	0,381	*id.*	0,450	141,0
0,80	0,864	0,024	*id.*	*id.*	207,5	0,870	0,024	*id.*	0,201	0,421	0,015	0,500	217,0
1,00	1,068	0,027	0,035	*id.*	292,0	1,078	0,027	0,035	0,240	0,460	0,017	0,600	332,0
1,10	1,174	0,030	0,040	*id.*	362,5	1,184	0,030	0,040	0,260	0,480	*id.*	0,650	427,5

211. *Tuyaux coniques à deux brides.*

Fig. 52.



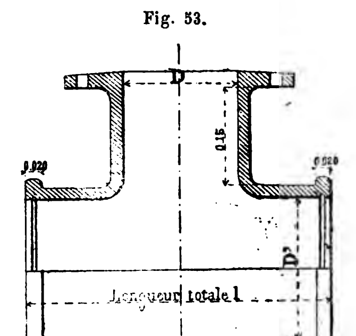
Dimensions invariables.

Longueur totale. . . . . . l = 0m,400
— . . . . . . l' = 0 ,250
— . . . . . . l'' = 0 ,080
Surépaisseur en C . . . . = 0 ,005

NOTA. Épaisseurs : 1° en A celle du tuyau à emboîtement du petit diamètre D' ;
2° en B celle du tuyau à emboîtement du grand diamètre D.

Manchons à tubulure.

Fig. 53.



Épaisseur du manchon. Celle du manchon droit du même diamètre D'.

Épaisseur de la tubulure. Celle du tuyau à emboîtement du diamètre D augmenté de 0m,005.

Pour D = 0m,10 longueur totale l = 0m,40
D = 0 ,15 à 0m,40 *id.* = D + 0m,25
D = 0 ,50 à 0 ,80 *id.* = D + 0 ,35
D = 1 ,00 à 1 ,10 *id.* = D + 0 ,45

POIDS DES TUYAUX CONIQUES A DEUX BRIDES ET DES MANCHONS A TUBULURES.

Diamètre des tubulures ou grand diamètre des cônes D.

DIAMÈTRE INTÉRIEUR des tuyaux D'.	0m,06	0m,10	0m,15	0m,20	0m,25	0m,30	0m,35	0m,40	0m,50	0m,60	0m,80	1m,00	1m,10
m.	k.	k.	k.	k.	k.	k.	k.	k.	k.	k.	k.	k.	k.
0,06	21,0	18,0	22,5	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
0,10	27,5	32,0	28,0	32,5	»	»	»	»	»	»	»	»	»
0,15	36,0	40,5	46,5	38,5	44,5	»	»	»	»	»	»	»	»
0,20	45,5	49,5	55,5	64,5	51,0	58,5	»	»	»	»	»	»	»
0,25	56,0	61,0	66,0	75,5	87,0	66,0	73,5	»	»	»	»	»	»
0,30	68,0	72,5	77,5	89,0	101,5	116,5	83,0	91,0	»	»	»	»	»
0,35	84,5	88,5	94,0	106,4	121,0	136,5	149,0	100,0	114,5	»	»	»	»
0,40	94,0	98,0	103,5	116,5	133,0	150,5	168,5	186,5	124,5	143,0	»	»	»
0,50	118,5	122,5	126,5	144,5	162,5	183,0	202,0	225,5	290,5	163,5	204,5	»	»
0,60	145,0	148,5	153,5	173,5	192,5	218,0	240,5	263,5	343,0	387,0	229,0	288,5	»
0,80	202,5	206,5	211,5	237,5	266,5	296,0	324,0	353,0	459,0	516,5	662,0	337,0	376,0
1,00	298,5	302,5	307,0	342,5	379,5	418,0	458,0	500,5	633,5	710,5	871,0	1 157,5	445,5
1,10	369,0	373,0	377,5	420,5	465,0	506,5	553,5	598,0	766,0	856,5	1 038,0	1 318,5	1440,5

212. *Nombre et dimensions des trous rectangulaires de boulons, pour brides.*

DIAMÈTRE extérieur de la bride.	DIAMÈTRE intérieur de la bride.	DISTANCE entre les centres de deux trous opposés diamétralement.	NOMBRE de trous.	DIMENSIONS des trous en millimètres.
m.	m.	m.	trous	
0,210	0,060	0,165	3	21 × 12
0,256	0,100	»	4	21 × 12
0 306	0,150	0,257	6	21 × 14
0,358	0,200	0,306	6	21 × 16
0,411	0,250	0,358	6	21 × 16
0,474	0,300	0,418	8	21 × 17,5
0,528	0,350	0,468	10	24 × 18
0,582	0,400	0,522	10	24 × 18
0,682	0,500	0,622	12	24 × 18
0,786	0,600	0,726	16	24 × 18
0,990	0,800	0,930	20	24 × 18
1,212	1,000	1,141	24	27 × 22
1,318	1,100	1,247	24	27 × 22

213. *Poids et dimensions des consoles pour tuyaux.*

DIAMÈTRE des tuyaux auxquels elles appartiennent.	LONGUEUR des consoles.	POIDS	DIAMÈTRE des tuyaux auxquels elles appartiennent.	LONGUEUR des consoles.	POIDS
m.	m.	k.	m.	m.	k.
0,06	0,300	1,5	0,30	0,700	15
0,10	0,400	4,0	0,35	0,800	17
0,15	0,500	7,0	0,40	0,800	17
0,20	0,650	12,0	0,50	0,850	27
0,25	0,700	15,0	0,60	0,960	32

Le prix de la fonte, à Paris, variant de 23 à 25 francs les 100 kilogr., on pourra calculer, à l'aide des tableaux précédents (de 203 à 213), les prix moyens des différents tuyaux.

214. *Poids des accessoires : Trappe, Borne-fontaine* (217), *Ventouse, Poteau d'arrosement.*

1° d'une trappe de regard en fonte	pour chaussée. . .	châssis. . . .	360 kilogr.
		tampon. . . .	130
	pour trottoir. . . .	châssis	200
		tampon.. . . .	140
2° d'une borne-fontaine avec plaque de fond . .		grand modèle.	150
		petit modèle .	90
3° d'une ventouse à flotteur avec tubulure de $0^m,081$			50
4° d'un poteau d'arrosement.			140

215. ***Pose en terre d'une conduite en fonte, à joints à emboîtements***

(à $1^{m},20$ de profondeur moyenne mesurée entre le dessus de la conduite et le dessus du pavé ou du trottoir, toutes fournitures et main-d'œuvre comprises, la fourniture de la fonte et l'essai des tuyaux seuls exceptés).

	DÉSIGNATION DES OUVRAGES.	DIAMÈTRES DES TUYAUX EN FONTE (*en mètres*).													
		0,030 à 0,040	0,054 à 0,060	0,100	0,150	0,200	0,250	0,300	0,350	0,400	0,500	0,600	0,800	1,000	1,100
		fr.	fr.	fr.	fr.	fr.	fr.	fr.	fr.	fr.	fr.	fr.	fr.	fr.	fr.
	1. Démontage de chaussée pavée, empierrée ou de trottoir	0,20	0,20	0,20	0,20	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0.30	0.30	0,40	0,45	0,45
	2. Ouverture de la tranchée	0,65	0.65	0,70	0,80	0,95	1,15	1,20	1,30	1,45	1,70	2,00	2,65	3,25	3,65
	3. Dressement du fond	0,05	0.05	0,05	0,10	0,10	0,10	0,15	0,15	0,15	0,15	0,20	0,20	0,25	0,25
	4. Façon des niches	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,10	0,10	0,10	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
a	5. Transport du tuyau à pied d'œuvre	0 05	0,10	0,20	0,25	0,30	0,45	0,55	0,70	0,80	1,05	1,45	2,15	2,75	3,45
a	6. Rapprochage et descente du tuyau	0,05	0,05	0,10	0,20	0,25	0,30	0,30	0,40	0,50	0,65	0,75	0,90	1.00	1,25
a	7. Mise en place	0,15	0,20	0,30	0,40	0,50	0,55	0,60	0,70	0,90	1,15	1,40	1,65	2,15	2,50
a	8. Plomb	0,30	0,30	0,45	0,85	0,90	0,95	1.15	1,25	1,30	1,50	1,95	2,50	3,00	3,30
a	9. Corde goudronnée	0,05	0,05	0,10	0,15	0.15	0,20	0,20	0,20	0.25	0,30	0,35	0,40	0.45	0,50
a	10. Façon des joints	0,20	0,20	0,45	0,55	0,75	0,95	1,00	1,05	1,15	1,25	1,45	1,65	1,90	2.15
	11. Remblai et pilonnage	0,35	0,40	0,40	0,45	0,55	0,65	0,65	0,70	0,70	0,80	0,95	1,15	1,40	1,45
	12. Premier pavage soigné de la tranchée, sans fourniture de sable, ou remise en place de l'empierrement, du vieux béton ou des dalles du trottoir	0,50	0,55	0,55	0,65	0,70	0,75	0,75	0,80	0,80	0,95	1,00	1,15	1.25	1,40
	13. Transport des terres excédantes aux décharges publiques	0,15	0.20	0,25	0.40	0,50	0,65	0,75	0,95	1,20	1,65	2,25	3,65	5,45	6,45
	Prix du mètre linéaire	2,75	3,00	3,80	5,05	5,95	7,00	7,65	8,55	9,55	11,60	14,20	18,60	23,45	26,95
	NOTA. La pose des tuyaux coniques sera comptée suivant leur diamètre moyen.														
	A déduire, lorsqu'il n'y aura pas lieu à démontage de chaussée pavée, d'empierrement ou de trottoir dallé ou bitumé	0,45	0,50	0,50	0,55	0,60	0,70	0,70	0,75	0,75	0,80	0,85	1,00	1,15	1,20
	Plus ou moins-value à ajouter ou à retrancher par mètre linéaire de tranchée et par décimètre de profondeur : de $1^{m},20$ à 2 mètres	0,10	0,11	0,11	0,14	0,15	0,17	0,18	0,18	0,19	0,21	0.24	0,27	0,30	0,32
	Idem au delà de 2 mètres	0,20	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,23	0,23	0,23	0,25	0,31	0,31	0,37	0,45
	Lorsqu'il y aura lieu de compter l'une ou l'autre des plus-values ci-dessus, elle ne s'appliquera qu'à l'excédent lui-même sur les profondeurs normales de $1^{m},20$ ou 2 mètres.														
	Plus-value par mètre linéaire de conduites avec joints à bagues	»	»	0,20	0,20	0,60	0,80	0,80	0,90	1,10	1,35	1,45	2,65	4,35	5,35
	Plus-value par mètre linéaire de conduites posées avec démolition de chaussée empierrée	1,00	1,05	1,05	1,25	1,40	1,55	1,55	1,70	1,75	1,95	2,15	2,15	2,40	2,55
	Sous galerie, la pose ne comprend que les six articles *a*.														

216. *Fourniture et pose en terre de conduites en plomb*

(à $1^m,20$ de profondeur moyenne mesurée entre le dessus de la conduite et le dessus du pavé ou du trottoir).

DÉSIGNATION DES OUVRAGES.	DIAMÈTRES DES TUYAUX EN PLOMB (*en mètres*).														
	0,005	0,010	0,013	0,016	0,020	0,025	0,027	0,030	0,035	0,040	0,050	0,055	0,060	0,081	0,100
	fr.	fr.	fr.	fr.	fr.	fr.	fr.	fr.	fr.	fr.	fr.	fr.	fr.	fr.	fr.
1. Démontage de la chaussée pavée, empierrée ou du trottoir.	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
2. Fouille et jet sur berge.	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,51	0,51	0,51	0,53	0,53	0,53	0,54
3. Dressement du fond de la tranchée	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
4. Fourniture du plomb.	0,75	0,77	1,39	1,65	3,15	3,67	4,62	5,10	5,79	6,49	7,70	8,43	9,35	11,97	16,35
5. Main-d'œuvre de pose du plomb (compris un nœud par 10 mètres jusqu'à $0^m,050$ et par 4 mètres au delà).	0,20	0,20	0,20	0,25	0,33	0,40	0,45	0,52	0,57	0,66	0,95	1,50	1,76	2,72	2,92
6. Remblai et pilonnage.	0,20	0,28	0,28	0,28	0,28	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,30	0,30
7. Transport aux décharges des terres excédantes.	0,10	0,14	0,14	0,14	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,16	0,16	0,16	0,18	0,19	0,20
8. Premier pavage soigné, sans fourniture de sable, ou remise en place de l'empierrement du vieux béton ou des dalles de trottoir . . .	0,40	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44
Prix du mètre linéaire posé à $1^m,20$ de profondeur.	2,35	2,53	3,15	3,46	5,05	5,65	6,65	7,20	7,95	8,75	10,25	11,55	12,75	16,35	20,95

217. *Pose d'une borne-fontaine de puisage public avec robinet à repoussoir, évitant le coup de bélier, non fournie par l'entrepreneur, avec cuvette et grille ordinaire en fonte, comprenant armature intérieure, robinet d'arrêt extérieur sous bouche à clef, mais non compris le branchement alimentaire.*

	NOMBRE d'objets	fr.	fr.	fr.
1. Démontage de la chaussée ou du trottoir, raccordement provisoire du sol, enlèvement des terres, etc., maçonnerie pour massifs	»	»	»	16,79
2. Vis pour fixer le coffre à la cuvette.	4	0,15	0,60	
3. Percement de trous pour lesdites vis.	8	0,15	1,20	
4. Taraudage de trous	4	0,10	0,40	
5. Boulons pour fixer la douille à la cuvette.	0k,330	0,85	0,28	
6. Rondelle en plomb pour le joint.	0k,420	0,55	0,23	
7. Porte en tôle de 0m,004 d'épaisseur, entrée, y compris trous, percements, vis, tourillons, cache-entrée, etc..	»	»	4,00	
8. Serrure en bronze.	»	»	4,00	
9. Boulons prisonniers à écrous en fer	2	0,25	0,50	
10. Nez en fonte avec bague en bronze portant pas de vis	1	3,25	3,25	
11. Rondelles en cuir gras de 0m,081 de diamètre pour le joint avec le robinet.	2	0,55	1,10	
12. Boulon de nez avec clavette maintenue par une chaînette fixée au coffre	1	1,00	1,00	
13. Transport de la borne-fontaine et de la cuvette, du dépôt à l'atelier, ou, lorsque la fonte sera fournie par l'entrepreneur, de son atelier à celui du fournisseur de robinets à repoussoir.	1	2,50	2,50	
14. Pose et ajustement des pièces à l'atelier	»	»	5,50	
				24,56
15. Peinture à l'huile, trois couches	»	»	»	1,00
16. Robinet en bronze à deux eaux, à décharge, pour arrêt au pied de la borne-fontaine.	3	5,00	15,00	
17. Chapeau en fonte audit robinet.	1	0,50	0,50	
18. Nœuds de soudure de 0m,020.	2	1,00	2,00	
19. Bouche à clef en fonte avec tabernacle en briques et ciment formant cuvette	1	16,65	16,65	
20. Transport de l'atelier au chantier de la borne-fontaine et de ses accessoires et mise en place de ladite.	»	»	10,85	
				45,00
Prix d'une borne-fontaine de puisage public, mise en place, non compris le robinet à repoussoir et ses accessoires.				87,35

218. *Prix de la fourniture et pose d'une bouche de lavage sous trottoir, avec tubulure d'arrivée par côté* 137f,15

Prix de fourniture et pose d'une bouche sous trottoir, pour arrosement au tonneau, avec tubulure sur le côté. 174f,00

Prix de fourniture et pose d'une bouche d'arrosage à la lance. 104f,45

Prix de fourniture et pose d'une borne-fontaine de puisage public, modèle de 1887, avec robinet et accessoires. 117f,00

Prix de fourniture et pose sous trottoir d'une bouche d'incendie de 0m,100 de diamètre pour pompe à vapeur, toutes fournitures et main-d'œuvre comprises. 315f,50

Une bouche d'incendie de 0m,040 de diamètre revient, toute posée, à. 146f,30

219. *Pose d'une fontaine Wallace, grand modèle, isolée, comprenant armature intérieure, robinet de jauge à deux clefs au pied de la fontaine, mais non compris le branchement à la suite de ce robinet.*

		fr.	fr.	fr.
1. Démontage de la chaussée ou du trottoir, terrassement, raccord provisoire du sol, enlèvement des terres excédantes, etc.	»	»	12,65	
2. Massif en maçonnerie de meulière et mortier de ciment	$0^{mc},800$	34,00	27,20	
3. Pose de tuyaux en fonte de $0^{m},10$ de diamètre pour le passage du tuyau alimentaire.	1	0,65	0,65	40,50
4. Tuyau en plomb de $0^{m},013$ de diamètre à l'intérieur et de $0^{m},004$ d'épaisseur, de la fontaine jusqu'au robinet de jauge, de 4 mètres de longueur	10^{k}	0,55	5,50	
5. Cuvette en zinc, avec tuyau de décharge à l'intérieur.	$1^{k},500$	2,90	4,35	
6. Tuyau en plomb de $0^{m},041$ et de 1 mètre de longueur scellé dans le massif pour décharge . . .	$11^{k},800$	0,55	6,49	
7. Kilogrammes de fer pour supports de la cuvette et du tuyau alimentaire.	5^{k}	0,85	4,25	
8. Nœud de soudure de $0^{m},013$ pour joindre le tuyau en plomb au tube en fonte	1	0,70	0,70	
9. Montage sur place de la fontaine, mise en place, pose et ajustement des pièces de fontainerie. .	»	»	10,31	31,60
10. Appareil de jauge complet de $0^{m},020$ de diamètre avec sa bouche à clef en fonte et tabernacle ordinaire				37,90
Prix de pose d'une fontaine Wallace isolée.				110,00

Une fontaine Wallace, petit modèle, comprenant tuyau intérieur et extérieur en plomb de $0^{m},020$ jusqu'au robinet de jauge et ledit robinet, revient, pour la pose, à $63^{fr},35$.

220. Bagues. Actuellement, la ville de Paris emploie, dans les égouts, des tuyaux qui sont entièrement cylindriques sur toute leur longueur. On les réunit au moyen de bagues en fonte (voir tableaux nᵒˢ 205 et 206), dans lesquelles pénètrent de la même quantité les extrémités des deux tuyaux à réunir. Avant de recouvrir le joint par une bague, on a soin de le garnir de glaise, afin que le plomb coulé pour remplir le vide annulaire compris entre la bague et les tuyaux ne s'échappe pas par ce joint. Les conduites maîtresses qui distribuent l'eau de la Dhuis dans Paris sont en tuyaux cylindriques de 4 mètres de longueur et $1^{m},10$ de diamètre. Les bagues ont $0^{m},10$ de longueur.

Le diamètre des conduites d'eau qui mesurait, en 1854, $0^{m},60$ au maximum, atteint aujourd'hui jusqu'à $1^{m},30$ et ne s'abaisse qu'exceptionnellement au-dessous de $0^{m},10$.

221. Joints. Les bons joints, sans cesser d'être étanches, doivent fournir des conduites parfaitement libres, travaillant sans efforts et sans bris.

Dans le principe, et dès Louis XIV, on fit usage de tuyaux à *brides* avec rondelle de cuir gras ou de plomb. Les conduites obtenues avaient l'inconvénient de former une barre rigide, sans élasticité et ne pouvant supporter aucune action du sol. Affaissements ou affouillements, vibrations, trépidations, chocs ou coups de bélier, etc., phénomènes

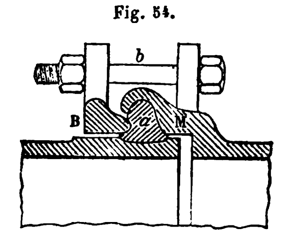
inévitables en distribution d'eau, ne pouvaient se produire sans accident. Les effets de la dilatation et de la contraction, auxquels les tuyaux échappent difficilement, ne s'opéraient pas davantage sans ruptures nombreuses. (Voir, pour les tuyaux à brides, les tableaux n°s 207 et 209.)

Pour remédier à ces inconvénients et surtout aux effets de la dilatation et de la contraction, on imagina les tuyaux à *emboîtement* et *cordon* avec joints en corde goudronnée et plomb coulé, puis maté. Ces tuyaux, encore employés aujourd'hui, ne résistent qu'en partie aux effets de la dilatation et de la contraction; bientôt le plomb n'adhérant plus à la fonte, il en résulte des fuites. De plus, à cause de leur grande rigidité, ils ne se prêtent pas, non plus que les tuyaux à brides, aux phénomènes d'affaissements, de vibrations, etc. (Voir tableau n° 203.)

Les tuyaux à joints articulés, du système de MM. Doré et Chevé, ne diffèrent des précédents qu'en ce que le manchon a un diamètre plus grand, et que le filet du bout mâle est remplacé par un large bourrelet à surface extérieure sphérique. Le plomb coulé et maté ne recouvrant pas entièrement la partie sphérique, les tuyaux peuvent prendre un certain mouvement d'articulation sans que les joints cessent d'être étanches. Mais les effets de dilatation et de contraction provoquent encore des fuites.

Afin d'obtenir des conduites à la fois élastiques et étanches, on a remplacé les joints en plomb par ceux en caoutchouc vulcanisé. Parmi les joints de ce système, on distingue celui de M. Petit, celui de M. Delperdange et celui de M. Lavril.

Fig. 54.



Le joint Lavril (*fig.* 54), qui donne d'excellents résultats, se compose d'une rondelle *a* en caoutchouc vulcanisé, comprimée dans le manchon M du tuyau par une bride mobile B serrée par des boulons *b*. Le nombre de ces boulons est de 3 à partir de 0m,10 de diamètre de tuyau, 4 à partir de 0m,20, et ainsi de suite. (Voir à l'*Éclairage*, les tuyaux pour conduites de gaz.)

222. Extrait du devis de la fourniture de tuyaux et pièces en fonte à faire, pendant l'année 1889, pour le compte de la ville de Paris.

L'entreprise s'applique à la fourniture pendant une année des tuyaux et des pièces de fonte nécessaires aux conduites d'eau dont l'entretien et la pose sont réservés aux entrepreneurs d'entretien de la fontainerie de la ville de Paris, ainsi que des plaques et tampons de regard d'égout (nouveau modèle), dont la commande aura été faite dans le courant de ladite année.

Le montant des fournitures est évalué approximativement à 1.500 tonnes. Mais ce chiffre n'est donné qu'à titre de renseignement et pourra être diminué de moitié ou doublé sans que l'adjudicataire puisse élever aucune réclamation à ce sujet.

Le cautionnement est fixé à la somme de 10000 francs. Il sera fourni, soit en obligations de la Ville de Paris, soit en rentes sur l'État au porteur et au cours de la veille du jour de l'adjudication. L'adjudicataire en touchera les arrérages. Les titres amortis seront remplacés par des titres de même nature.

Les pièces présenteront exactement les dimensions et les formes indiquées à l'album

des types joint au présent devis, et elles devront avoir également les poids inscrits au dit album. Ce sont :

1° Des tuyaux à emboîtement et cordon et des tuyaux cylindriques de diamètres divers (de 0m,06 à 1m,10), et de longueurs utiles de 2m,50 et de 3 mètres (203 et 204).

2° Des bagues droites et des bagues biaises, des bouts d'extrémité, des manchons droits et courbes, des brides, des manchons à tubulures, employés dans la pose et la réparation des conduites (205, 206, 207, 210, 211).

3° Des tuyaux courbes 1/8 et 1/16 de cercle, à emboîtement et cordon, et à brides, de diamètres variant entre 0m,06 et 1m,10 (208 et 209).

4° Des tuyaux coniques à deux brides, des mêmes diamètres que précédemment (211).

5° Des consoles pour tuyaux, trappes en fonte pour regards d'égout, colonnettes en fonte (de 0m,80, 1 mètre et 1m,10) pour supporter les conduites, pièces diverses de 0m,10 de diamètre (212 et 213).

Provenance et qualité de la fonte. Mode d'exécution. Les pièces de fonte devront être fabriquées dans des fonderies françaises.

La fonte sera de la meilleure qualité, point aigre, bien homogène, susceptible d'être travaillée à la lime, sans fente ni écornure. Pour en constater la qualité, on la soumettra à l'épreuve suivante : il sera coulé par chaque fusion une paire de barreaux d'épreuve dans du sable très sec ; l'agent de la ville, présent à la fusion, déterminera le moment où les barreaux devront être coulés. Ces barreaux auront 0m,04 d'équarrissage et seront terminés par des appendices disposés en vue de s'opposer au retrait. Un barreau placé horizontalement sur deux couteaux, espacés de 0m,16, devra supporter sans se rompre le choc d'un mouton de 12 kilog. tombant librement sur le barreau, de 0m,40 de hauteur, au milieu de l'intervalle des deux points d'appui. L'enclume supportant les couteaux aura un poids d'au moins 800 kilogrammes. Les barreaux pourront aussi être travaillés au tour, puis soumis à des épreuves de résistance, à la traction ou à la flexion. A la traction, ils ne devront se rompre que sous un effort de 13kg,5 par millimètre carré.

Tous les tuyaux droits seront coulés debout. Le moulage devra être fait avec des précautions telles qu'il ne se trouve aucune bavure. Les parois intérieures et extérieures des pièces devront être lissées et parfaitement nettoyées de sable avant d'être coltarisées.

Les brides ne pourront être percées que suivant les modèles étalons en zinc, indiquant l'espacement et les dimensions des trous et qui seront remis à l'entrepreneur par l'administration. Les brides des pièces de plus de 0m,40 de diamètre intérieur ne seront pas percées, mais les brides des tubulures de ces pièces devront être percées, si le diamètre intérieur des tubulures est inférieur à 0m,40.

Chaque pièce portera une marque en relief, en caractères de 0m,01 de hauteur au moins, indiquant en toutes lettres le nom de l'usine dans laquelle elle aura été fondue. Cette marque sera placée sur le filet de l'emboîtement ou de la bride, ou à 0m,20 de l'extrémité si la pièce n'a ni emboîtement ni bride.

A une distance d'un centimètre de leur origine, tous les emboîtements seront évidés suivant une surface annulaire de 6 millimètres de diamètre (0m,006).

Toutes les pièces des fontes, avant d'être livrées, seront enduites de coaltar, mais la coltarisation ne sera faite qu'après l'examen et l'épreuve des pièces, dont il sera parlé au chapitre suivant. On ne recevra aucune pièce sur laquelle on apercevrait des vestiges de rouille.

L'entrepreneur ne fera aucune fourniture que sur une commande écrite des ingénieurs. Cette commande déterminera la nature et le nombre des pièces à fabriquer ; l'entrepreneur en accusera réception dans un délai de cinq jours.

Mode de réception. Livraisons et délais. L'adjudicataire sera soumis aux vérifications à l'usine que l'administration jugera convenable d'ordonner pour s'assurer de la qualité de la fonte, comme il est dit ci-dessus et pour vérifier si toutes les précautions propres à garantir une bonne exécution sont prises, tant pour le parfait dressage des modèles que pour l'exact ajustement des châssis et pour les soins de moulage et de percement. L'agent délégué par la ville procédera, en outre, en présence de l'entrepreneur ou de son représentant, aux vérifications et épreuves suivantes :

Chaque pièce sera examinée tant à l'extérieur qu'à l'intérieur. Ses dimensions seront

mesurées et on la frappera à petits coups de marteau pour s'assurer s'il n'y a ni chambres, ni soufflures.

On rebutera les tuyaux :

1° Dont on aurait caché les défauts avec du plomb, du mastic ou autrement;

2° Dont l'épaisseur non uniforme dans le pourtour présenterait entre son maximum et son minimum une différence supérieure à la limite accordée ci-après;

3° Dont l'emboîtement aurait un des diamètres intérieurs plus grand ou plus petit que le diamètre prescrit, d'une quantité dépassant la tolérance;

4° Dont le bout mâle aurait un de ses diamètres extérieurs présentant un vice analogue.

On rebutera aussi les bagues qui auraient l'un des défauts signalés au paragraphe 3.

Les tolérances concédées pour les différences d'épaisseur des tuyaux, les excédents des emboîtements et les moins-trouvés des bouts mâles seront de $0^m,003$ pour les tuyaux de $0^m,25$ de diamètre et au-dessous, et de $0^m,004$ pour les autres. Ces tolérances seront de moitié seulement pour les moins-trouvés des emboîtements et pour les excédents des bouts mâles.

Les tuyaux droits seront essayés à la presse hydraulique sous une pression de 15 atmosphères .Lorsqu'il y aura suintement avec bouillonnement et, à plus forte raison, si l'eau s'échappe par petits jets, le tuyau sera rebuté. Si la dixième partie d'une coulée ne résiste pas aux essais, tous les tuyaux compris dans cette coulée seront rebutés.

Toutes les pièces seront pesées; celles dont les poids ne seront pas inférieurs de 1/20 aux poids normaux indiqués dans les tableaux dressés par l'administration seront reçues si elles résistent aux épreuves; il en sera de même de celles qui présenteraient des poids trop forts. Mais si le poids total des pièces fournies dans une année dépasse le total des poids réglementaires de ces pièces, l'excédent ne sera pas compté au fournisseur.

Il sera dressé de chaque réception un procès-verbal, qui sera immédiatement soumis pour acceptation à la signature de l'entrepreneur; chaque pièce figurera sur le procès-verbal avec son poids et son numéro d'ordre qui sera peint à l'huile sur le tuyau. Les pièces au-dessous du diamètre de $0^m,300$ pourront être groupées pour le pesage jusqu'au poids maximum de 600 kilogr. Une expédition de ce procès-verbal sera remise à l'entrepreneur et la minute restera entre les mains de l'ingénieur pour servir à la rédaction du compte de l'entreprise.

Le fournisseur, après la réception des tuyaux, devra les transporter de l'usine aux dépôts spéciaux de la Ville ou à pied d'œuvre sur tous les chantiers établis par le service municipal, suivant les ordres qui lui auront été donnés. Ses charretiers devront toujours être munis de lettres de voiture qui porteront la désignation précise des diverses pièces composant le chargement, faute de quoi, il pourrait être refusé. Lorsque les livraisons seront faites au dépôt des fontes, quai d'Austerlitz, les frais de déchargement et de rangement des pièces seront au compte de la ville de Paris, qui fera exécuter ces manutentions par l'équipe d'ouvriers qu'elle y entretient en permanence. Celles qui ne seraient pas dans un état de propreté qui en permette l'examen seront rigoureusement refusées.

Les pièces refusées pour une cause quelconque devront être immédiatement enlevées par les soins et aux frais de l'entrepreneur.

Si après l'arrivée des tuyaux, ou dans le cours de la pose, on signalait dans une pièce de fonte un défaut provenant soit du transport à la charge du fournisseur, soit de la fabrication, le fournisseur en restera responsable nonobstant la réception provisoire à l'usine. La pièce rebutée sera réintégrée au dépôt si elle en est sortie, le tout aux frais de l'entrepreneur, qui devra l'enlever et la remplacer dans les délais qui lui seront prescrits.

L'administration se réserve le droit de faire procéder, au dépôt du quai d'Austerlitz, aux épreuves, pesées et réception, qui doivent être opérées à l'usine, sans que l'entrepreneur puisse élever aucune réclamation à ce sujet. Dans les deux cas, il supportera tous les frais de pesées et d'essais; seulement, pour les opérations faites au dépôt, il n'aura pas à fournir la presse hydraulique et l'eau, ni la bascule, qui seront mises à sa disposition par la Ville. Il pourra également, dans ce dernier cas, se servir, pour la coltarisation, des appareils installés au dépôt.

L'entrepreneur aura un délai unique d'un mois après l'approbation de l'adjudication pour exécuter tous les modèles des pièces qu'il peut être appelé à fournir d'après le devis. Ce temps passé, il lui sera accordé, pour toutes ses fournitures, un délai uniforme d'un mois à dater de chaque commande pour mise en fabrication des pièces, épreuves et réception, transport au lieu indiqué.

En dehors de ce délai, il ne lui sera accordé que les délais de fabrication, calculés sur les bases ci-après :

Un jour par 50 tuyaux droits de $0^m,15$ de diamètre et au-dessous ;

Un jour par 30 tuyaux droits de $0^m,20$ à $0^m,30$ de diamètre ;

Un jour par 20 tuyaux droits de $0^m,35$ à $0^m,40$ de diamètre ;

Un jour par 10 tuyaux droits de $0^m,50$ à $1^m,10$ de diamètre ;

Un jour par 5 trappes de regard.

Les livraisons seront faites sans discontinuité, de manière à ce qu'il n'y ait jamais à l'usine plus du produit de la fabrication d'une semaine, éprouvé et reçu. Ces livraisons seront composées en pièces de toute nature, dans la proportion où elles figurent aux commandes, de manière à ce que les tuyaux droits soient toujours précédés des consoles, bagues et pièces de raccord nécessaires à leur emploi. Aucun délai en sus de ceux qui ont été fixés pour la livraison des tuyaux droits n'est donc accordé pour les pièces accessoires, à moins que celles-ci (bagues et consoles non comprises) ne représentent en nombre plus de 10 p. 100 des tuyaux droits de même diamètre. Dans ce dernier cas, les pièces en excédent sur la proportion indiquée compteraient dans le calcul du délai, chacune pour un tuyau.

Lorsqu'une commande comprendra plus d'une bague ou de deux consoles par tuyau droit uni, les bagues ou consoles en excédent compteront dans les délais à raison de dix pour un tuyau.

Lorsqu'il résultera de l'accumulation des commandes successives que la production de l'usine devrait dépasser 20 tonnes par jour pour fabriquer, dans les délais susindiqués, les pièces demandées, le temps accordé à l'entrepreneur sera prolongé de ce qui sera nécessaire pour que la production quotidienne reste dans la limite de 20 tonnes.

L'entrepreneur, tout en observant les délais susindiqués, devra suivre, dans la fabrication des différentes natures de pièces, l'ordre de priorité qui lui sera fixé. Il sera dressé des états des fournitures en retard qui serviront de base au calcul des retenues à opérer sur le décompte de l'entrepreneur, conformément à ce qui suit :

Prix des fournitures, conditions particulières et générales. Le prix des fontes sera réglé au kilogramme d'après l'offre indiquée sur la soumission qui sera agréée. Ce prix comprend les frais de toute nature à faire jusqu'à livraison et réception complète, sauf ce qui a été dit ci-dessus, au sujet des frais de manutention au dépôt du quai d'Austerlitz. Il comprend, en outre, les droits d'octroi actuellement en vigueur pour l'entrée à Paris. Il sera également appliqué aux livraisons faites hors Paris, mais dans ce cas, sous la réserve d'une déduction correspondante à la différence ou à l'inexistence des droits d'octroi.

L'adjudicataire sera tenu de reprendre dans l'état où elles se trouveront les vieilles fontes mises hors de service et ce, jusqu'à concurrence de 15 p. 100 du poids des fontes neuves fournies. La valeur de ces vieilles fontes sera portée en déduction sur les décomptes et calculée à un taux égal aux trois dixièmes (3/10) du prix soumissionné.

Il est expressément entendu que le prix consenti par l'adjudicataire ne pourra subir de changement dans aucun cas, quelles que soient d'ailleurs les variations que viendraient à subir les droits de douane et de navigation. Il n'est fait d'exception que pour les droits d'octroi dont les changements sont à la charge comme au bénéfice de la Ville.

Les retenues à exercer sur les fournitures en retard seront encourues de plein droit et calculées, pour chaque semaine de retard, à raison de 1 p. 100 sur la valeur des tuyaux droits et de 5 p. 100 sur celles des pièces de raccord et trappes de regard. En cas d'urgence signalée antérieurement à l'entrepreneur, l'administration pourra compléter les fournitures en retard aux frais de l'entrepreneur.

Lorsque l'entrepreneur ne se conformera pas aux délais indiqués dans les ordres de service pour l'enlèvement des vieilles fontes ou des fontes rebutées, il sera passible de plein droit, pour chaque semaine de retard, d'une retenue calculée à raison de

2 p. 100 de la valeur des fontes à enlever. Les retenues seront notifiées à l'entrepreneur et portées à son compte.

Le payement des fournitures annuelles se fera par acomptes jusqu'à concurrence des neuf dixièmes de la dépense faite; le dernier dixième, retenu comme garantie, ne sera payé que dans le premier trimestre de l'année suivante.

L'adjudicataire devra avoir à Paris un mandataire dûment accrédité auquel seront valablement notifiées les communications de l'administration.

L'adjudicataire sera tenu, à peine de nullité du marché, d'acquitter dans les trois jours qui suivront celui de l'adjudication, le montant des droits de timbre, d'enregistrement et autres auxquels l'adjudication aura donné lieu, et notamment ceux d'impression du présent devis et de l'album des types qui devra y demeurer annexé.

L'entrepreneur sera soumis aux clauses et conditions générales imposées aux entrepreneurs des ponts et chaussées par décision de M. le ministre des travaux publics, en date du 16 novembre 1866, en toutes les dispositions auxquelles il n'est pas formellement dérogé par le présent devis.

223. Extrait du devis d'entretien et du bordereau des prix de la fontainerie de la ville de Paris (*Adjudication du 1er janvier* 1889 *au* 31 *décembre* 1891).

CONDITIONS RELATIVES A L'EXÉCUTION DES TRAVAUX EN GÉNÉRAL.

Ouverture de tranchées. Lorsque pour la pose de conduites il y aura lieu de procéder à l'ouverture d'une tranchée, l'entrepreneur l'exécutera suivant le tracé et la profondeur indiqués par l'ingénieur et en ayant soin de ranger les terres et les matériaux qu'il sera tenu de remettre en place, en se conformant aux conditions détaillées ci-après. S'il est reconnu que les déblais ne peuvent pas, sans inconvénient, rester sur le chantier, l'entrepreneur sera tenu de les transporter dans tel endroit qui lui conviendra pour les reprendre ensuite et les réemployer, le tout à ses frais.

Il sera, en tous cas, tenu de prendre toutes les précautions nécessaires pour préserver les ouvrages dépendant du service municipal, tels que candélabres, bancs, arbres, etc., et sera responsable des dégradations qui seraient de son fait ou de celui de ses ouvriers.

Transport à pied d'œuvre et descente des tuyaux. Les tuyaux et autres pièces de fontainerie seront pris aux lieux de dépôt indiqués par l'ingénieur, et transportés à pied d'œuvre; toutefois, l'administration se réserve la faculté de les faire amener par les fournisseurs eux-mêmes; dans ce cas, on retranchera des prix de pose et autres prix similaires portés à la série, le sous-détail correspondant au prix de transport, pourvu que les pièces ainsi approvisionnées aient été déposées à moins de 100 mètres du lieu d'emploi ou de descente.

L'entrepreneur est responsable de toutes les avaries qui arriveront aux tuyaux et autres pièces de fontainerie, à partir du moment où ils lui auront été livrés; la valeur des pièces trouvées brisées ou détériorées après cette livraison sera déduite de son décompte.

Lorsque les pièces devront être posées sous galerie, le service des ateliers se fera autant que possible par les trappes de regard que l'entrepreneur devra faire entourer et garder avec soin; il sera autorisé en cas de besoin à percer les voûtes des égouts et galeries, mais seulement aux points désignés par l'ingénieur; il sera tenu de les refermer à la fin du travail et de faire tous les raccordements nécessaires, etc., etc. Ce travail sera payé au métré et au prix de la présente série.

Les tuyaux seront descendus avec soin dans les galeries ou dans les tranchées où ils devront être placés. Lorsqu'il n'y aura pas d'échelons dans les regards de l'égout où l'entrepreneur fait exécuter un travail, il devra mettre à la disposition de ses ouvriers une échelle assez longue pour faire la descente sans danger; la même obligation lui est imposée pour les tranchées à raison d'une échelle au moins par intervalle de 75 mètres.

Pose des tuyaux. Au moment de leur mise en place, les tuyaux devront être visités à l'intérieur et soigneusement débarrassés de tous les corps étrangers qui pourraient y avoir été accidentellement introduits.

Les tuyaux en fonte seront assemblés, soit par des joints à emboîtement, soit au moyen de brides ou de bagues.

Joints à emboîtement. La pénétration de deux tuyaux consécutifs sera moindre que la profondeur de l'emboîtement, de manière à laisser 1 centimètre de jeu pour la dilatation. On aura soin de placer en dessus la portion de l'emboîtement qui portera le mamelon. Le bout mâle de chaque tuyau sera engagé dans le renflement du tuyau suivant, de manière à rendre régulier l'intervalle compris entre les parois intérieures de l'un et les parois extérieures de l'autre. Cet intervalle sera rempli, partie avec de la corde neuve imprégnée de goudron, partie avec du plomb fondu. La profondeur du joint en plomb sera de 4 centimètres.

La corde, roulée régulièrement autour du bout mâle, sera matée au refus et disposée de manière à laisser un vide de profondeur uniforme pour recevoir le plomb, lequel sera lui-même maté après le refroidissement.

Joints à brides. Dans la confection des joints à brides, on laissera entre les brides un intervalle suffisant pour recevoir une rondelle en plomb convenablement dressée et enduite, sur les deux faces, d'une couche de mastic ou de minium.

Les rondelles auront la forme d'un anneau plat dont le diamètre intérieur sera égal à celui des tuyaux à raccorder et dont le diamètre extérieur sera calculé de manière à affleurer les trous des boulons. Ces rondelles auront, en général, 0,012 d'épaisseur uniforme. Lorsqu'elles devront être biaises, leur épaisseur sera variable et déterminée par l'obliquité à donner aux tuyaux; toutefois, elles ne devront pas avoir, au point le plus mince, moins de 1 centimètre d'épaisseur.

Les boulons destinés à relier les brides des tuyaux auront 0,018 de diamètre; ils seront faits et filetés avec le plus grand soin. Ces boulons seront serrés graduellement les uns après les autres jusqu'au refus et la rondelle sera refoulée avec un ciseau à mater.

Joints à bagues. Dans les joints à bagues, on conservera entre les deux bouts de tuyau, pour les mouvements de dilatation, un intervalle de 0,002 en se servant à cet effet d'une plaque en tôle; on masquera le vide avec de la terre glaise pour empêcher la pénétration du plomb; le joint devra partager la bague exactement par le milieu.

Le vide entre la bague et le tuyau sera entièrement rempli en plomb fondu, lequel sera maté au refus après le refroidissement.

Joints de divers systèmes. L'entrepreneur devra, s'il est fait emploi de joints de forme particulière ou d'un système nouveau, se conformer aux instructions qui lui seront données.

Tubulures. Les tubulures d'attente et les extrémités des conduites seront tamponnées par des plaques pleines en fonte fixées à la tubulure au moyen d'une bride.

Tuyaux en plomb. Les tuyaux en plomb posés en terre devront être assemblés au moyen de nœuds de soudure; sous galerie, ils pourront l'être au moyen de brides.

Étanchéité des joints. Les joints d'assemblage de toutes les conduites, quelles qu'elles soient, devront être absolument étanches.

Sujétion sous galerie. Dans le cas où, par suite de l'impossibilité de faire dans les égouts des percements assez rapprochés, l'entrepreneur serait obligé de transporter les tuyaux à plus de 75 mètres sous galerie pour les mettre en place, la pose de la partie de conduite formée par ces tuyaux donnera lieu à une plus-value portée au bordereau des prix.

Épreuves des conduites. Avant de recouvrir de terre chacune des portions de conduites nouvellement posées, on y mettra l'eau et on leur fera éprouver, à l'aide d'une pompe de presse hydraulique, une pression équivalente à huit atmosphères; cette opération, y compris les travaux préparatoires nécessaires, tels que pose de plaques pleines, butées, etc., sera faite au compte de l'entrepreneur.

L'entrepreneur devra exécuter immédiatement et à ses frais les travaux de réparation, quels qu'ils soient, dont cette épreuve aura fait reconnaître la nécessité. Il sera ensuite procédé à une nouvelle épreuve faite dans les mêmes conditions que la précédente.

Il en sera de même pour les conduites posées sous galerie, avant qu'elles ne soient mises en service.

Comblement des tranchées et rétablissement du sol. L'entrepreneur demeure chargé de remblayer toutes les tranchées ouvertes par lui sur la voie publique.

Il aura dû, au moment du déblai, mettre soigneusement de côté les matériaux de la chaussée ou du dallage, y compris, dans le cas de pavage, le sable de l'ancienne forme.

Les remblais seront en terre, bien purgés de pierre et faits par couches de 0,20 au maximum, pilonnés avec le plus grand soin et arrosés lorsque l'ordre en sera donné.

L'emploi des boues en remblai est formellement interdit.

L'entrepreneur devra ensuite rétablir soit le dallage, soit le pavage ou l'empierrement, en réemployant les mêmes matériaux.

Dans le cas de pavage, l'ancienne forme devra être rapportée avec soin à la surface du remblai, en réservant seulement la quantité de sable nécessaire pour remplir les joints.

Les premiers pavages sur tranchées seront faits par des compagnons paveurs.

Les pavés seront portés en suivant exactement les rangées et les dalles de trottoirs d'après leur appareil.

Dans les chaussées asphaltées et trottoirs en bitume, le bitume ou l'asphalte et le béton de fondation seront soigneusement mis de côté, le vieux béton sera répandu à la surface du remblai, les débris de bitume et d'asphalte seront rangés à proximité, de manière à ne pouvoir encombrer la circulation.

Pour les chaussées empierrées, l'empierrement sera rétabli après avoir été fortement pilonné et arrosé ; il en sera de même des terres, s'il n'y a aucune chaussée.

Les saillies sur l'ancien profil ne devront être nulle part de plus de 0,05.

L'entrepreneur sera responsable de tous les matériaux des chaussées, quelle qu'en soit la nature ; il devra remplacer à ses frais ceux qui auraient été enfouis sous le remblai, perdus ou détériorés de quelque manière que ce soit par le fait de ses ouvriers.

Il aura la responsabilité et l'entretien des premières réfections sus-indiquées jusqu'à l'exécution de la viabilité définitive, qui sera faite par le service de la voie publique. Toutefois, cette garantie ne s'étendra pas au delà des 20 jours qui suivront l'achèvement complet du travail.

Faute par l'adjudicataire d'assurer convenablement l'exécution et l'entretien des travaux provisoires dont il s'agit, il y sera pourvu d'office à ses frais, risques et périls, par les soins des ingénieurs.

Dépose des conduites. — Pour déposer les conduites devenues inutiles, l'entrepreneur ouvrira une tranchée, aussi étroite que faire se pourra, en ayant soin de ranger les pavés au bord de la tranchée avec les précautions convenables.

Il déboîtera ensuite les tuyaux après avoir fait fondre les joints en plomb, s'il y a lieu, et de manière à éviter toute rupture ; toutes les pièces seront séparées, les tubulures et plaques d'extrémité détamponnées, déboulonnées et parfaitement nettoyées intérieurement et extérieurement, puis enlevées et transportées dans les magasins de la Ville Le plomb seul sera repris par l'entrepreneur et la valeur, calculée d'après les prix du bordereau, sera déduite du décompte

La tranchée sera remblayée avec les soins indiqués à l'article précédent.

L'entrepreneur remplacera à ses frais les tuyaux et pièces de fontainerie qu'il aurait brisés ou dégradés ou qui auraient disparu.

Prises d'eau, pose de plaques pleines, etc. — Les prises d'eau devront être faites sur conduites en charge, s'il y a lieu, sans plus-value spéciale.

En exécutant ces prises d'eau, les percements de tuyaux, et la pose des plaques pleines à l'extrémité des conduites, l'entrepreneur devra prendre toutes les précautions nécessaires pour éviter les fuites et se conformer aux instructions qui lui seront données par les agents de la ville.

Les percements sur conduite de fonte seront faits suivant le calibre voulu, avec la machine à percer, de telle sorte que les bords soient francs et nets de toute bavure. Ceux sur conduites de tôle et bitume devront toujours être faits au trépan et le bitume devra être rétabli sur la soudure du tuyau de prise.

Composition des soudures et alliages. — Les soudures pour nœuds, embranchements, empattements, etc., seront composées d'un tiers de bon étain et de deux tiers de plomb.

L'alliage de cuivre, qui sera exclusivement employé pour la robinetterie et pour toutes les pièces accessoires de la distribution, sera celui qui est connu dans le com-

merce sous le nom de « bronze » On ne fera usage de l'alliage de cuivre dit « laiton » ou « cuivre jaune » que sur les indications spéciales des ingénieurs.

Le bronze contiendra en poids :

1° Pour les vis de robinets-vannes, clefs de robinets ordinaires, etc.,

90 parties de cuivre,
10 — d'étain,
2 — de zinc.

2° Pour les écrous, boisseaux de robinet, etc.,

86 parties de cuivre,
14 — d'étain,
4 — de zinc.

Et le laiton contiendra :

100 parties de cuivre,
pour 50 — de zinc.

Échantillons de soudure, bronze, laiton, etc. — L'entrepreneur sera tenu de déposer aux bureaux des ingénieurs, dans le premier mois de l'adjudication, des échantillons de soudure, de bronze et de laiton pour servir à la vérification des ouvrages ultérieurs.

En cas de fraude constatée dans la composition des soudures et des alliages, l'entrepreneur sera passible d'une amende de *cinq cents francs*, indépendamment des frais de vérification qui resteront alors à sa charge.

Pour faciliter la constatation du poids des robinets et autres pièces de fontainerie en bronze, l'entrepreneur fera marquer au poinçon sur chaque pièce et en caractères parfaitement lisibles son poids en kilogrammes et en décagrammes.

Toute fausse indication sera assimilée à une fraude dans la composition des alliages et donnera lieu à l'application de l'amende stipulée ci-dessus.

Le poids effectif des colliers, compris boulons en fer forgé de tous diamètres, devra être indiqué sur chacun d'eux en chiffres poinçonnés ou peints à l'huile.

En cas de fraude constatée dans cette indication, l'entrepreneur sera passible d'une amende de *cinquante francs*.

S'il y a déficit, la pièce sera rejetée. Toutefois, il sera admis une tolérance de 1/10 en moins pour les colliers des diamètres de $0^{m},054$ à $0^{m},50$ et de 1/20 pour ceux des diamètres supérieurs, tant pour l'application de l'amende ci-dessus que pour le manque de poids amenant le rejet de la pièce.

S'il y a excédent de poids ou de dimensions, il n'en sera pas tenu compte à l'entrepreneur.

Entretien des conduites. — L'entretien des conduites comprend celui de tous les appareils accessoires interposés sur leur parcours ou placés à leur extrémité, depuis les bondes des réservoirs jusqu'aux robinets de décharge, tels que les robinets et soupapes de toutes sortes et même les bouches à clef.

L'entrepreneur devra se conformer, pour les diverses opérations à effectuer, aux prescriptions du chapitre précédent et aux ordres spéciaux qui pourront lui être donnés.

Conduites en plomb et en fonte. — La réparation des conduites en plomb et en fonte comprend toutes mains-d'œuvre et fournitures, y compris celle des bouts de tuyaux neufs qu'il pourrait être nécessaire de substituer aux anciens tuyaux et les pièces accessoires de raccord et d'assemblage.

Conduites en tôle et bitume.— En cas de perforation d'un tuyau en tôle et bitume, le bitume sera enlevé sur une faible étendue avec un fer chaud; si l'ingénieur de la Ville juge que le trou peut être fermé, on se contentera de gratter et de décaper la tôle et d'y rapporter un grain de soudure.

Le bitume sera ensuite remis avec les précautions nécessaires.

Dans le cas où le tuyau ne serait pas jugé réparable, il sera remplacé par un tuyau en fonte.

Si le vieux tuyau ne pouvait se démonter, on le couperait à la scie, on fretterait les deux bouts et on remplacerait la partie enlevée par un tuyau en fonte relié au reste de la conduite par deux manchons.

L'entrepreneur sera tenu de réparer les perforations de la tôle dans le voisinage des prises d'eau, même particulières, et d'y rétablir, s'il y a lieu, le brai manquant.

Remplacement des tuyaux hors de service. — Les tuyaux entiers en fonte qui seront substitués aux vieilles conduites de toute nature en mauvais état, auront le même diamètre que les anciens ou des diamètres les plus rapprochés parmi ceux en usage dans le service des eaux; ils seront fournis par l'administration; toutes les autres fournitures ainsi que les frais de main-d'œuvre resteront à la charge de l'entrepreneur, même ceux de dépose, repose ou raccordement de robinets ou appareils publics qu'il y aurait à déplacer ou à modifier par suite de ces remplacements partiels.

En outre, l'administration se réserve la faculté, pour assurer un travail complet, de faire remplacer quelques tuyaux à la suite de ceux qui seraient défectueux, et cela aux mêmes conditions

Pour le report des branchements publics et particuliers sur ces tuyaux ainsi remplacés, y compris déplacement de la prise d'eau, les matières seront fournies par la ville et la main-d'œuvre sera à la charge de l'entrepreneur.

Lorsque de vieux manchons à coquille seront rencontrés dans les travaux de réparations, ils seront supprimés et remplacés par des manchons ronds aux frais de l'entrepreneur.

Maintien des bouches à clef au niveau du sol. — L'entrepreneur devra maintenir au niveau du sol toutes les bouches à clef, y compris celles appartenant aux établissements publics, mais non celles posées par la Compagnie générale des Eaux, de manière à assurer toujours la manœuvre facile des robinets.

Le travail sera à ses frais, même quand il sera nécessité par le rétablissement du profil des chaussées et trottoirs, ou le redressement des bordures sur quelque longueur que ce soit.

L'entrepreneur sera tenu, à cet effet, d'avoir des tubes de rallongement de $0^m,15$ à $0^m,40$ de longueur pour les bouches à clef.

Toutefois le même travail ne sera pas à sa charge en cas de changements apportés aux profils primitifs de la voie publique.

L'entrepreneur fera à ses frais les recherches nécessaires pour découvrir les bouches à clef qui se trouveraient engagées dans le sol, par quelque cause que ce soit.

Entretien des ouvrages de distribution. — L'entretien à forfait des ouvrages de distribution des eaux, tels que bornes-fontaines en général, fontaines Wallace, effets d'eau d'urinoirs, etc., comprend celui de leurs mécanismes, des grilles, cuvette en fonte ou en maçonnerie sous les effets d'eau des fontaines, des pitons d'attache des gobelets des fontaines Wallace, tuyaux de décharge en fonte ou en poterie à la suite jusqu'à l'égout, de tous les appareils hydrauliques, des fontaines monumentales, des fontaines de puisage, des bornes-fontaines à repoussoir, des bouches de puisage pour marchés forains, des branchements de ces divers appareils, des robinets de prise et de jauge, de leurs fourreaux en fonte ou en poterie et, en général, de tous leurs accessoires.

L'entreprise ne s'applique pas aux réservoirs de chasse dans les égouts, mais seulement à leur branchement.

L'entretien à forfait comprend encore le maintien ou le rétablissement au niveau du sol et à l'alignement des bordures de trottoir de tous les appareils hydrauliques, dans les conditions indiquées à l'article précédent pour les bouches à clef.

Il comprend enfin la réparation des maçonneries d'égouts, regards et massifs des appareils hydrauliques, dégradés par les fuites ou leurs conséquences, et la reconstruction en leur état primitif des parties de maçonnerie démolies pour réparations de conduites ou de robinets.

Nettoiement. — L'entrepreneur est obligé d'entretenir constamment en parfait état de propreté :

1° Les regards et puisards ainsi que les chambres des robinets;

2° Les réservoirs et cuvettes métalliques ou à simple revêtement métallique, ainsi que tous les autres appareils de distribution, placés à l'intérieur des fontaines monumentales et publiques;

3° Les vasques et les bassins extérieurs des fontaines monumentales, ainsi que les caveaux et galeries qui en dépendent;

4° Les fontaines Wallace et leurs cuvettes;

5° L'intérieur et l'extérieur des bornes-fontaines, bouches d'eau sous trottoir, poteaux d'arrosement, intérieur des coffres de bouches d'incendie.

Le nettoiement sera opéré une fois par semaine pour les vasques et bassins en maçonnerie des fontaines monumentales et pour les fontaines Wallace. Il sera fait, pour ces dernières, à la brosse en crin dite « passe-partout ».

Ce nettoiement sera effectué une fois par mois pour les coffres de bouches d'incendie et pour les regards et puisards, tous les deux mois pour les réservoirs et cuvettes métalliques et tous les quatre mois pour les bornes-fontaines.

Toutefois ces nettoiements devront être recommencés en dehors de ces délais quand la nécessité en sera reconnue par l'Administration.

L'entrepreneur fera enlever à ses frais, aux décharges publiques, les boues, vases et immondices, provenant de ces divers nettoyages.

Peinture. — La conservation de la peinture des bornes-fontaines, poteaux d'arrosement et coffres d'incendie est une des charges du forfait.

En conséquence, tous ces appareils devront être repeints à neuf tous les trois ans, c'est-à-dire grattés à vif, après brûlage des anciennes couches de peinture de manière à en enlever toute trace, et ensuite recouverts d'une couche de minium et de deux couches de vert olive de nuances différentes.

Cette opération sera faite pour la première fois au printemps de 1890 et comprendra (pour cette première fois) l'addition d'une troisième couche de peinture. Puis, pour les années intermédiaires, y compris 1889, l'entrepreneur fera, au printemps et par un temps sec, nettoyer à la brosse et à l'eau, et recouvrir d'une couche de peinture vert olive à l'huile de lin, tous lesdits appareils de distribution indistinctement.

Paiement des travaux. — L'entretien à forfait, la pose et la dépose des conduites, soit en tranchées, soit sous galerie, seront payés au mètré courant pour les conduites de toute nature, quelle que soit d'ailleurs la sujétion résultant des parties courbes, de l'emploi de bagues biaises, etc., c'est-à-dire que l'entrepreneur ne pourra réclamer aucune plus-value autre que celles prévues au bordereau des prix.

Les plaques neuves d'extrémités et des tubulures d'attente seront seules payées à part.

En conséquence, on mesurera sur les conduites elles-mêmes leurs longueurs totales après la pose, on comptera le nombre de pièces et on appliquera à ces longueurs et à ces nombres les prix portés au bordereau. Ces prix s'appliquent même au cas où l'on ferait poser des conduites ou parties de conduites en tuyaux de longueur réduite.

Pour déterminer la profondeur moyenne de la fouille au-dessus du tuyau, on mesurera, en cours d'exécution, la profondeur de cette fouille partout où il y aura changement d'inclinaison, soit dans le profil longitudinal de la conduite, soit dans celui du sol sous lequel elle sera placée, et la profondeur cherchée sera représentée par la surface du profil entre le *dessus* du tuyau et le sol, divisée par la longueur.

Lorsque la dépose d'une conduite sera immédiatement suivie de la repose à nouveau, dans la même tranchée ou dans le même égout, avec ou sans démontage partiel des joints, mais sans transport dans le sens longitudinal, on ne paiera que la moitié des prix de pose et de dépose portés à la série, déduction faite des double transport, approchage, descente et sortie des tuyaux, et sans déduction du vieux plomb.

224. Pose des tuyaux. Ordinairement, les conduites d'eau se placent en pleine terre, sous le pavé des rues, et à 1 mètre de profondeur, afin qu'elles soient préservées de la gelée et des vibrations; à Paris, cette profondeur, qui est comptée au-dessus du tuyau, est de $1^{m},40$. Ce moyen est le plus simple et le plus économique. Quelquefois on a placé les conduites dans des rigoles en maçonnerie établies sous le pavé des rues et recouvertes de madriers en bois; mais la construction est dispendieuse et les fuites difficiles à trouver. D'autres fois, surtout pour les conduites principales, on les a placées dans des galeries voûtées en maçonnerie. Enfin, on les place encore dans les égouts, ce qui est moins

dispendieux que quand on établit des galeries spéciales; mais la pose est assez difficile et la manœuvre des robinets peu commode.

Afin que la garniture des joints soit élastique, on la fait en corde et en plomb. Les ouvriers plombiers arrivent promptement à bien faire cette garniture, qui peut exceptionnellement, s'il manque d'ouvriers exercés dans la localité par exemple, être faite avec un mastic composé d'un mélange de 98 parties de limaille de fonte tamisée et non oxydée, et de 1 partie de fleurs de soufre, sur lequel on verse une dissolution de 1 partie de sel ammoniac dans l'eau bouillante. On amène le mélange à la consistance d'un mortier ordinaire en le brassant fortement, et de suite on en remplit les joints en le bourrant avec force.

225. Tuyaux en plomb. On a coulé des tuyaux en plomb jusqu'au diamètre intérieur de $0^{m},216$; ils avaient 4 mètres de longueur. En 1818, on a étiré les tuyaux, mais sans dépasser le diamètre de $0^{m},108$. Depuis 1840, on comprime le plomb sous un piston de presse hydraulique, et on l'oblige à passer par un orifice annulaire, d'où il sort en tuyaux. On atteint ainsi jusqu'au diamètre de $0^{m},10$; mais au-dessus de cette limite, les tuyaux se font avec des plaques de plomb que l'on soude après les avoir roulées.

La longueur des tuyaux en plomb est de $3^{m},90$. Pour les joindre entre eux, on taille leurs extrémités en sifflet, afin que l'un pénètre un peu dans l'autre, et l'on fait un nœud de soudure.

Pour calculer l'épaisseur à donner à un tuyau en plomb, on peut se servir de la formule n° 202, ou encore de celle-ci :

$$e = \frac{hD}{2R}.$$

(Voir, pour l'application de ces tuyaux aux conduites de gaz, à l'*Éclairage*.)

D'après les expériences de Navier, la ténacité absolue du plomb est de $1^{k},35$ par millimètre carré de section, et la charge sous laquelle le plomb commence à s'étendre varie entre la moitié et les deux tiers de la résistance absolue. Adoptant $1^{k},30$ pour la ténacité absolue, cette résistance étant 10 fois plus petite que celle de la fonte, il paraît naturel de donner aux tuyaux en plomb 10 fois plus d'épaisseur qu'à ceux en fonte placés dans les mêmes circonstances. Cependant, comme on fait facilement, même sous une faible épaisseur, des tuyaux en plomb homogènes dans toutes leurs parties, et que ces tuyaux ont moins à redouter des chocs, on peut, dans la formule précédente, faire R égal à 1/4 de la résistance absolue, c'est-à-dire à $0^{k},325$. C'est à peu près la résistance adoptée pour les tuyaux en fonte coulés debout.

Dans une note publiée dans les *Annales des ponts et chaussées* (année 1873), Belgrand fait voir que l'emploi des tuyaux en plomb dans les conduites d'eau ne peut être nuisible à la santé publique. C'est pourquoi ces tuyaux sont en usage dans toutes les villes de France et dans la plupart des villes de l'Europe, sans qu'on ait jamais eu à s'en plaindre. (Voir n° 216 : *Fourniture et pose de conduites en plomb.*)

226. Les conduites publiques et privées de la ville de Paris qui n'atteignaient que 360 kilomètres en 1854, 1400 kilomètres au 1[er] janvier 1873, mesurent aujourd'hui environ 2000 kilomètres.

La *guerre au plomb*, qui avait pris un si grand développement en 1872, serait sans objet, s'il n'y avait un réseau composé de branchements très courts, d'un petit diamètre, et qui, à peu d'exceptions près, sont tous en plomb. Ils relient les conduites publiques aux orifices de puisage.

Malgré le développement énorme de ce réseau, chaque litre d'eau puisé pour la consommation des habitants ne parcourt qu'une très petite longueur de conduite en plomb, 5 mètres à peine, lorsque le puisage est fait aux orifices de la voie publique, 100 mètres au plus lorsque le branchement aboutit dans une maison particulière.

Lorsque la maison est habitée, le plus long séjour de l'eau dans les conduites en plomb peut être évalué ainsi :

Abonnements à robinets libres	Séjour pendant la nuit, 9 heures. Séjour pendant le jour, de 5 à 10 minutes.

Abonnements jaugés, écoulement continu, au plus de 3 à 6 heures.

Le temps du contact de l'eau avec les parois de la conduite est trop court pour que le plomb soit attaqué. En effet, des 3 kilomètres environ de conduites en plomb qui restent dans le réseau des conduites publiques, on en démonte quelques-unes de temps en temps, et l'on constate que leur surface intérieure est toujours parfaitement lisse et sans trace d'érosion. L'une, démontée après plus de 200 ans de pose, montrait encore dans son intérieur l'impression des grains de sable du moule.

Quant aux branchements en plomb, ils se tapissent promptement d'une légère croûte adhérente qui empêche le contact de l'eau et du plomb.

Les chimistes savent depuis longtemps avec quelle facilité s'oxyde le plomb immergé dans l'eau distillée ayant le contact de l'air. Il se forme très rapidement de l'oxyde de plomb hydraté en très petits cristaux blancs, à éclat nacré, dont la quantité va toujours en augmentant et finit par former un dépôt notable au fond des vases. Il en est de même de l'eau de pluie très pure. Au contraire, l'eau contenant une petite quantité de sels, principalement l'eau de puits séléniteuse, n'attaque pas du tout le plomb dans les mêmes conditions.

Les eaux très pures, telles que celles du puits de Grenelle, qui marquent de 8 à 10° à l'hydrotimètre, possèdent encore la propriété de préserver le plomb de l'oxydation. Des eaux marquant même moins de 1° à l'hydrotimètre conservent encore cette même propriété. Enfin, l'eau de pluie elle-même peut ne pas attaquer le plomb, si elle n'a pas été recueillie avec le plus grand soin et après une sorte de lavage prolongé de l'atmosphère par l'eau pluviale. Pour peu que l'eau de puits indique la présence des sels de chaux par les réactifs, on lui reconnaît la propriété de ne pas agir sensiblement sur le plomb. Lorsque l'eau de pluie est devenue insensible à l'action des réactifs de la chaux, elle commence à attaquer le plomb assez rapidement, à la manière de l'eau distillée.

Les tuyaux en plomb ne peuvent s'employer, dans les machines, que pour des conduites de températures modérées, car à 100° le plomb se ramollit beaucoup.

227. Tuyaux en plomb doublés d'étain. M. Hamon obtient ces tuyaux en étirant sur broche un manchon creux de plomb et d'étain, dans lequel ce dernier métal occupe la paroi intérieure sur une épaisseur déterminée à l'avance et qui se réduit pendant l'étirage dans la même proportion que celle du plomb qui l'entoure. Ce mode de fabrication permet de donner à la doublure d'étain, dont l'épaisseur régulière est de un demi-millimètre au moins, la propriété d'isoler complètement le plomb du liquide. Aussi les tuyaux en plomb doublés d'étain trouvent-ils leur emploi dès que le liquide est susceptible d'attaquer le plomb.

(Voir : *De l'action de l'eau sur les conduites en plomb, Annales des ponts et chaussées*, année 1874.)

228. Tuyaux en terre et en grès. Il serait difficile de dire à quelle époque a commencé l'usage de ces tuyaux pour les conduites d'eau; mais comme les tuyaux en poterie ordinaire n'offraient pas un degré de solidité suffisante, leur usage avait été toujours très restreint.

Dès 1838, M. Zeller a établi à Ollwiller (Haut-Rhin) une fabrique de tuyaux en terre cuite émaillés. Ces tuyaux, fabriqués d'une terre choisie, et moulés sous la pression de machines puissantes, sont très réguliers et très résistants; aussi leur usage a-t-il pris une certaine extension, soit pour conduites d'eau, soit pour conduites de gaz.

Le 25 juillet 1862, des épreuves faites à l'arsenal de Besançon, en présence de MM. Parandier et Berthelin, ingénieurs, ont fourni les résultats suivants :

Diamètres des tuyaux en millimètres :								
30	53	75	93	120	141	175	240	40 (*a*)
Pressions, en atmosphères, réalisées au moment de la rupture :								
31	22	34	25	15	21	14	15	24

(*a*) Ce tuyau de 0m,040 avait été depuis 17 ans enfoui sous le sol.

Les parois des tuyaux, suivant les diamètres, ont de 0m,02 à 0m,03 d'épaisseur.

MM. Petit et Cie, de Rambervillers (Vosges), fabriquent des tuyaux en grès qui paraissent ne rien laisser à désirer sous le rapport de la régularité, de l'homogénéité de la matière et de la solidité.

Deux tuyaux étant placés bout à bout, on amène le manchon de jonction de manière que le milieu de sa longueur corresponde au joint des tuyaux; puis on remplit de ciment l'intervalle compris entre les tuyaux et le manchon; enfin, on raccorde les extrémités du manchon avec la surface des tuyaux par un solin en ciment. Ce que l'on peut reprocher à ce joint, c'est de manquer entièrement d'élasticité.

La maison Doulton et Cie, de Londres, qui a une succursale à Paris, fabrique depuis longtemps des tuyaux en grès simples, coniques ou doubles. En voici les dimensions et prix, à Paris :

Diamètre intérieur en centimètres.	5	7,50	10	12,5	15,2	19	22,8
Poids approximatif du mètre. Kilog.	4	10	12	18	24	34	40
	fr.	fr.	fr.	fr.	fr.	fr.	fr.
Le bout de $0^m,60$ centimètres	0,60	0,90	1,00	1,20	1,50	2,25	3,00
Le mètre linéaire	1,00	1,50	1,65	2,00	2,50	3,75	5,00
Caniveaux à collet $0^m,60$ centimètr.	»	»	0,75	»	1,00	1,40	1,65
Tuyaux operculaires, le bout $0^m,60$.	»	1,10	1,25	1,50	2,00	2,75	3,50
Coudes N°s 1, 2, 3.	1,00	1,50	1,75	2,25	2,75	3,50	4,50
Jonctions simples et coniques . . .	1,25	1,75	2,25	2,50	3,00	4,00	5,00
Jonctions doubles.	1,75	2,50	3,00	3,25	3,75	5,50	6,75
Diamètre intérieur en centimètres.	25,4	30,5	38	45,7	53	61	76
Poids approximatif du mètre. Kilog.	50	56	86	120	200	225	400
	fr.	fr.	fr.	fr.	fr.	fr.	fr.
Le bout de $0^m,60$ centimètres. . . .	3,60	4,50	7,80	10,80	16,80	21,00	36,00
Le mètre linéaire	6,00	7,50	13,00	18,00	28,00	35,00	60,00
Caniveaux à collet $0^m,60$ centimètr.	»	3,00	4,50	6,30	8,40	10,80	18,80
Tuyaux operculaires, le bout $0^m,60$.	4,25	5,00	8,50	11,50	»	»	»
Coudes N°s 1, 2, 3.	5,50	6,50	11,25	14,00	28,00	35,00	55,00
Jonctions simples et coniques. . . .	6,00	7,50	12,00	15,00	30,00	37,50	60,00
Jonctions doubles	7,50	10,00	17,00	23,00	40,00	50,00	80,00

Il peut être fourni des tuyaux de 6,5, 17,5, 20,3 centimètres de diamètre.

Les tuyaux en grès, qui se répandent chaque jour davantage à cause de leur économie pécuniaire, et que plusieurs maisons françaises exploitent également, sont utilisables surtout pour les égouts et les canalisations à faible pression.

229. Tuyaux en tôle d'acier. La société Chameroy construit des tuyaux en tôle d'acier et en bitume de la même manière que des tuyaux en tôle de fer. La tôle d'acier est plombée sur les deux faces, puis roulée pour en former un tuyau qui est rivé et soudé sur toute sa longueur. On le recouvre ensuite de bitume comme les tuyaux de tôle de fer. L'épaisseur de la tôle d'acier est calculée en raison de la résistance des conduites. Ces tuyaux présentent, sur ceux en tôle de fer (Voir la section: *Éclairage*, pour les tuyaux en fer), les avantages suivants :

1° Le plombage est supérieur à cause de la finesse du grain du métal;

2° La résistance à la traction et à la pression intérieure est de 50 à 60 p. 100 plus grande;

3° La résistance à la déformation dans le sens longitudinal est de 30 à 40 p. 100 plus considérable;

4° L'élasticité plus grande de la tôle d'acier permet aux tuyaux de subir des chocs assez forts sans déformation et sans que la malléabilité du métal soit compromise.

Pour les conduites d'eau à hautes pressions, ces tuyaux sont préférables aux tuyaux en tôle de fer et bitume.

Les tuyaux en tôle de fer sont établis pour supporter une pression constante de 5 atmosphères, soit une charge de 50 mètres de hauteur

d'eau. A épaisseur égale, les tuyaux en tôle d'acier résistent à une charge de 100 mètres d'eau.

Les tuyaux en tôle d'acier et bitume peuvent être employés avec avantage pour l'établissement des conduites d'eau ou de gaz, sur les ponts suspendus, pour les conduites provisoires qui doivent être souvent déplacées, et dans toutes les circonstances où l'on doit employer des conduites légères et résistantes à la fois.

230. Tuyaux en bois. Leur résistance à la traction est très grande; mais ils sont très promptement détruits par la pourriture. Les bois employés à la confection de ces tuyaux sont le chêne, l'aune et l'orme.

231. Distribution d'eau dans une ville. M. Darcy résume de la manière suivante les questions à étudier dans un projet de distribution d'eau :

1° Fixation du volume nécessaire à la fourniture d'eau;
2° Qualités que doivent présenter les eaux dérivées;
3° Jaugeage ou détermination de leur volume;
4° Travaux à faire pour les élever ou les dériver;
5° Théorie du mouvement des eaux dans les canaux ou dans les tuyaux de conduite (184 et suivants);
6° Réservoirs;
7° Ouvrages à effectuer pour assurer la distribution intérieure;
8° Egouts.

Mais la première condition, pour étudier convenablement et rapidement un projet de distribution d'eau et d'assainissement pour une ville, est de faire un nivellement complet du terrain et des rues que doivent parcourir les conduites et égouts.

232. Volume d'eau nécessaire. Dans la marine, où le pain est fait d'avance, où l'on ne lave le linge et ne nettoie à fond le navire qu'en relâche, la consommation d'eau de chaque homme est réglée à environ 3 litres par jour; on peut donc estimer à environ 5 litres par jour la limite inférieure de la consommation d'eau.

M. Gravatt (enquête de 1844) admet pour une famille anglaise d'ouvriers aisés, composée du père, de la mère et de 3 enfants, une consommation de 40 litres par jour.

Il résulte d'observations précises qu'un homme absorbe en moyenne, par jour, 2 litres d'eau pour sa boisson et ses aliments, et 18 litres pour les divers usages externes (toilette, bains, etc.), soit en tout 20 litres.

Par une distribution abondante, comme celle qui convient à une ville comme Paris, on peut régler le volume d'eau d'après le tableau suivant :

Par jour..	Par personne (*)	20 litres.
	Par cheval	75 —
	Par vache	75 —
	Par voiture à deux roues, pour nettoyage	40 —
	Id. à quatre roues, de luxe	100 —
	Id. *id.* de louage	50 —
	Par mètre carré d'allée, cour et jardin	3 —
	Par boutique	100 —

(*) Le chiffre 20 litres en moyenne par personne est modifié ainsi qu'il suit par les

Par heure de marche.	Par cheval-vapeur pour machine à haute pression	35 —
	Id. *id.* à détente et condensation. .	600 —
	Id. *id.* à basse pression	1000 —
Par bain		300 —
Par hectolitre de bière.		200 —
Par jour, pour le lavage des ruisseaux et égouts, par robinet. .		5000 à 6000 —
Pour un arrosage de 1 mètre carré de rue (A Paris, pendant les grandes chaleurs, on en fait souvent trois par jour).		1 —

Il y a encore à tenir compte du débit des fontaines monumentales. A Paris, ce débit est de 18000 mètres cubes par jour. La gerbe du Palais-Royal a été calculée pour un débit de 23 litres par seconde, la fontaine de la place Saint-Georges pour 1 litre, celle de la place Richelieu pour 9 litres, l'ancienne gerbe du rond-point des Champs-Élysées pour 25 litres, et chacune des fontaines de la place de la Concorde pour 55 litres.

A Paris, les fontaines monumentales jaillissant très peu de temps, il y a lieu de considérer le chiffre de 18 litres comme un minimum.

Les fontaines destinées à des puisages particuliers, et qui sont en général à repoussoir, débitent environ 20 mètres cubes par jour.

Dans le Midi, la chaleur surexcite la consommation; dans le Nord, la fumée, la boue, créent des besoins de propreté qui n'ont pas une influence beaucoup moindre.

On ne peut donc donner le chiffre absolu de l'eau nécessaire à une grande ville, tant les conditions peuvent varier. On admet généralement que, pour la plupart des villes de France, le chiffre de 200 à 250 litres est suffisant; plusieurs villes (Marseille, Carcassonne, etc.) dépassent de beaucoup ces chiffres. Lyon réclame 600 litres et Paris 1000 litres par jour et par habitant.

L'augmentation de la consommation de l'eau, depuis plusieurs années, a dépassé la progression de la population. Il faut encore avoir égard, dans l'évaluation du cube d'eau nécessaire à une ville, aux pertes de toutes sortes dues aux appareils, à l'évaporation et à la négligence des consommateurs. Ces pertes peuvent atteindre de 25 à 50 p. 100.

La consommation de l'eau atteint son minimum en janvier et février. Elle se réduit à cette époque aux 93/100 de la dépense moyenne. Le maximum de consommation a lieu en juin et juillet. Elle atteint alors les 108/100 de la dépense moyenne.

233. **Quantité d'eau distribuée dans les grandes villes par habitant et par jour.** Les chiffres suivants montrent que la plupart des grandes villes sont dotées d'une distribution d'eau insuffisante.

La ville de Paris, avec sa population de 2430000 habitants, dispose d'une alimentation par habitant et par jour de 254 litres.

Si, pour d'autres villes de France, le chiffre est plus élevé, exemples :

Marseille (380000 habit.).	1000 litres (en 1890)
Carcassonne (26000 habit.)	400 —
Besançon (58000 habit).	260 —

bases qui servaient à fixer les abonnements par estimation aux eaux de la ville de Paris : 30 litres par personne domiciliée, 5 litres par ouvrier, et 10 litres par élève ou militaire.

pour la grande majorité des grandes villes de France, la quantité moyenne d'eau par habitant et par jour est moins considérable. Exemples :

Limoges (64 000 habit.)	240 litres.
Dijon (60 000 habit.).	240 —
Melun (12 000 habit.).	210 —
Orléans (58 000 habit.).	200 —
Tours (53 000 habit.).	190 —
Nantes (127 000 habit.).	150 —
Lyon (402 000 habit.)	150 —
Toulouse (145 000 habit.)	120 —
Troyes (47 000).	110 —

Dans les principales villes des deux mondes, les chiffres sont les suivants, environ :

Naples (512 000 habit.).	370 litres	(en 1889).
Venise (152 000 habit.).	40 —	
Rome (401 000 habit.).	1 000 —	
Washington (228 000 habit.).	700 —	
New-York (1 627 000 habit.)	1 000 —	(en 1891).
Philadelphie (1 040 000 habit.).	257 —	
Londres (4 425 000 habit.)	175 —	
Édimbourg (260 000 habit.)	181 —	
Dublin (355 000 habit.).	172 —	
Glascow (750 000 habit.).	200 —	
Berlin (1 575 000 habit.)	75 —	
Munich (335 000 habit.)	160 —	
Cologne (283 000 habit.)	200 —	
Francfort (180 000 habit.)	223 —	
Leipzig (354 000 habit.)	150 —	
Christiania (135 000 habit.)	175 —	
Buda-Pesth (443 000 habit.)	140 —	
Lausanne (32 000 habit.).	500 —	
Vienne (809 000 habit.).	170 —	(en 1889).
Saint-Pétersbourg (930 000 habit.).	95 —	
La Haye (150 000 habit.).	75 —	
Stockholm (222 000 habit.).	70 —	
Madrid (483 000 habit.)	15 —	
Porto (Portugal) (130 000 habit.).	100 —	
Calcutta (795 000 habit.).	95 —	
Bombay (750 000 habit.).	90 —	
Alexandrie (231 000 habit.).	80 —	
Rio-de-Janeiro (420 000 habit.)	135 —	
Buenos-Ayres (550 000 habit.).	90 —	

Nous avons dit que Paris dispose de 254 litres d'eau par jour; mais comme les services publics et l'industrie en absorbent 194 litres, il en résulte que la part de chaque habitant n'est que de 60 litres pour les usages domestiques.

234. Qualités et analyse des eaux. — Hydrotimétrie L'*eau pure* est composée, en poids, de 88,89 d'oxygène et de 11,11 d'hydrogène, et en volumes, de 2 volumes d'hydrogène et de 1 volume d'oxygène, condensés en 2 volumes (à l'état gazeux); sa formule en équivalents est HO, et sa formule atomique H_2O (Voir Deuxième partie : *Notations chimiques*).

L'eau de pluie, de source et de rivière est appelée *eau douce*, par opposition à celle de la mer et de certains lacs, qui est *salée.*

L'eau, telle que nous l'offre la nature, n'est jamais d'une pureté absolue; elle contient toujours diverses matières étrangères qui proviennent de l'atmosphère et des terrains qu'elle traverse; celles qu'on y rencontre le plus généralement sont : l'air, l'acide carbonique, le carbonate de chaux, le carbonate de magnésie, le sulfate de chaux, le sulfate de magnésie, le sulfate de soude, le chlorure de sodium, le chlorure de magnésium, l'iode, la silice et les silicates alcalins, les matières organiques.

L'*eau potable* est celle qui est bonne à boire; sans être pure, elle ne doit contenir les sels précédents qu'en petite quantité. Les substances qui lui sont utiles ou nécessaires sont l'air, l'acide carbonique et le chlorure de sodium. Pour être parfaitement salubre, l'eau ne doit contenir ni sulfate de chaux ou de magnésie, ni substances organiques en dissolution. Les sels autres que les sulfates, tels que les carbonates de chaux et de magnésie, particulièrement, loin de nuire à la qualité de l'eau, la rendent saine et agréable quand ils n'y sont pas dissous en excès. Dans ce dernier cas, ils ont de plus l'inconvénient d'incruster les conduites en fonte, ce qui arrive quand la proportion de sels calcaires dépasse 25 centigrammes par litre d'eau.

Pour être potable, l'eau doit du reste être limpide, aérée, sans odeur, sans saveur sensible et surtout agréable. Sa température doit être constante de 10° à 12°, de manière à rester suffisamment fraîche en été et ne devenir jamais trop froide en hiver. Elle doit bien dissoudre le savon, en formant mousse, sans grumeaux, et bien cuire les légumes.

Les eaux trop chargées de sels terreux cessent d'être potables et propres aux usages domestiques, et on les nomme vulgairement *eaux crues.* On distingue les eaux crues chargées de sulfate de chaux, dites *eaux séléniteuses*, et celles qui sont chargées de carbonate de chaux et de magnésie. Du reste, l'une et l'autre de ces eaux sont impropres au savonnage et à la cuisson des légumes : au savonnage, parce que la chaux et la magnésie se combinent avec l'acide gras du savon et forment avec lui un savon calcaire insoluble; à la cuisson des légumes, parce qu'elles les durcissent, ces mêmes bases formant avec certains acides qui existent dans les plantes des sels insolubles qui restent fixés dans le tissu de ces dernières. On reconnaît chimiquement la présence du sulfate de chaux dans les eaux, à ce qu'elles ne se troublent pas par l'ébullition et forment des précipités abondants avec le chlorure de baryum et l'oxalate d'ammoniaque. On peut rendre les eaux séléniteuses, sinon potables, au moins propres aux usages domestiques et industriels, en y versant une dissolution de carbonate de soude, qui transforme le sulfate de chaux dissous en carbonate de chaux insoluble, lequel se précipite. Quant au sulfate de soude qui provient aussi de la réaction et qui reste en dissolution dans l'eau, il n'est pas nuisible.

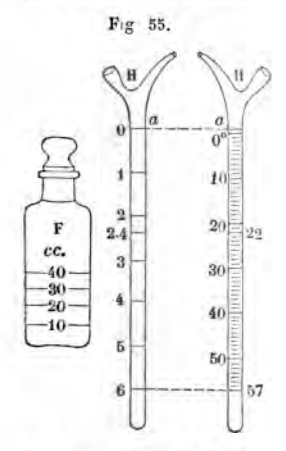
Si, sur 100 parties, une eau est chargée de n parties de chaux, n est son *degré de dureté.*

Hydrotimètre. Autrefois, c'était par l'analyse chimique ordinaire

qu'on procédait pour doser, soit les divers sels calcaires, soit les volumes d'air, d'acide carbonique et autres substances utiles ou nuisibles contenues dans les eaux. A cette méthode lente et difficile, qui exige des habitudes de manipulation chimique, MM. Boutron et Boudet ont substitué la méthode *hydrotimétrique*, qui consiste à classer les eaux d'après leur degré de dureté ou la quantité de sels qu'elles tiennent en dissolution. Elle a pour point de départ les curieuses observations du docteur Clarke, et elle est fondée sur la *propriété si connue que possède le savon de rendre l'eau pure mousseuse, et de ne produire de mousse dans les eaux chargées de sels terreux et particulièrement à base de chaux et de magnésie, qu'autant que ces sels ont été décomposés et neutralisés par une proportion équivalente de savon, et qu'il reste un petit excès de celui-ci dans la liqueur.*

Les essais hydrotimétriques s'exécutent au moyen d'un flacon F jaugé à 10, 20, 30 et 40 centimètres cubes, et d'une burette ou hydrotimètre H, qui contient une échelle de jauge en centimètres cubes d'un côté et l'échelle hydrotimétrique de l'autre.

Fig 55.



Chaque essai exige 40 centimètres cubes ou 40 grammes d'eau, que l'on mesure dans le flacon F.

L'hydrotimètre est gradué de telle manière que le trait circulaire *a*, marqué au sommet de l'instrument, est la limite que la liqueur doit atteindre pour qu'il soit chargé.

La division comprise entre ce trait *a* et la division 0° représente la proportion de liqueur nécessaire pour produire le phénomène de la mousse avec l'eau distillée pure.

Les degrés à partir de 0 sont les *degrés hydrotimétriques.*

La composition de la liqueur a été calculée de manière que chaque degré représente $0^{gr},1$ de savon neutralisé par 1 litre d'eau soumise à l'expérience, et correspond soit à $0^{gr},0114$ de chlorure de calcium, soit à $0^{gr},01$ de carbonate de chaux pour la même quantité d'eau. (La liqueur est une dissolution de savon blanc de Marseille dans de l'alcool à 90° centésimaux et de l'eau distillée, et qui doit toujours être essayée avant d'être employée, si l'on n'est pas sûr de sa composition.)

Le degré hydrotimétrique d'une eau indique donc immédiatement la proportion de savon qu'elle neutralise par litre, et la mesure de sa pureté.

L'hydrotimètre est non seulement utile pour classer les eaux d'après leur pureté, il sert aussi à en faire, dans certaines limites, une véritable analyse. Le nécessaire hydrotimétrique contient tout ce qui est utile pour cette analyse.

Essai. Pour faire l'essai d'une eau, on en mesure 40 centimètres cubes dans le flacon d'essai F, et l'on y ajoute peu à peu la liqueur dont on a rempli l'hydrotimètre jusqu'en *a*; on examine de temps en temps si elle

produit par l'agitation une mousse légère et persistante. Cette mousse doit former à la surface de l'eau une couche régulière de plus de 0m,005 d'épaisseur, et se maintenir au moins 10 minutes sans s'affaisser. La division à laquelle la liqueur est descendue dans l'hydrotimètre quand on a obtenu cette mousse dans le flacon est le degré hydrotimétrique de l'eau essayée. Ce degré indique :

1° Le nombre de décigrammes de savon que cette eau neutralise par litre;
2° La mesure de sa pureté ou la place qu'elle occupe dans l'échelle hydrotimétrique.

Soit 20 le degré observé, il en résulte que 1 litre de l'eau essayée neutralise 20 décigrammes ou 2 grammes de savon, et que cette eau porte pour numéro d'ordre 20 degrés dans l'échelle hydrotimétrique.

Si l'eau soumise à l'expérience donne naissance à des grumeaux lorsqu'on la mélange avec la liqueur hydrotimétrique, ou si son degré dépasse 25 à 30°, on doit en conclure que cette eau est trop chargée de sels de chaux et de magnésie pour qu'on puisse l'essayer telle qu'elle est, et qu'il est nécessaire de la mélanger avec de l'eau distillée de manière à la ramener à un degré hydrotimétrique inférieur à 30 degrés. On y ajoute donc 1, 2, 3,... fois son volume d'eau distillée, suivant qu'elle est plus ou moins impure; cette addition se fait facilement à l'aide du flacon d'essai F, qui est jaugé de 10 en 10 centimètres cubes jusqu'à 40. Le mélange étant fait en proportions convenables, on en détermine le degré, lequel multiplié par 2, 3 ou 4, selon qu'on a ajouté un volume d'eau distillée égal à 1, 2 ou 3, donne le degré de l'eau à essayer.

235. *Tableau des degrés hydrotimétriques de quelques eaux, et des quantités de savon décomposé avant de produire la mousse, pour un mètre cube d'eau.*

EAUX.	DEGRÉS hydrotimétriques.	SAVON décomposé.
	degrés	kilog.
Eau distillée	0	0
— de neige, à Paris	2,5	0,250
— de pluie, à Paris	3,5	0,350
— de l'Allier, à Moulins	3,5	0,350
— de la Dordogne, à Libourne	4,5	0,450
— de la Garonne	5,0	0,500
— de la Loire, à Tours et à Nantes	5,5	0,550
— du puits de Grenelle	9	0,900
— *id.* de Passy	11	1,100
— de la Somme-Soude	13,5	1,350
Eaux du Rhône, de la Saône et de l'Yonne	15	1,500
Eau de la Seine, au pont d'Ivry	19,1	1,910
— *id.* au pont d'Austerlitz	19,7	1,970
— *id.* à Chaillot	20,6	2,060
— de la Vanne, à Montsouris	20,6	2,060
— de la Marne, à Charenton	23	2,300
— de la Dhuis, à sa source	24	2,400
— de l'Escaut, à Valenciennes	24,5	2,450
— d'Arcueil	28	2,800
— du canal de l'Ourcq, à la Villette	34,9	3,490
— des Prés Saint-Gervais	72	7,200
— de Belleville	128,0	12,800

La connaissance du degré hydrotimétrique, en donnant les quantités de savon décomposé avant de produire la mousse ou l'effet utile sur le linge qu'on veut blanchir, suffit dans un grand nombre de cas pour reconnaître si une eau est plus ou moins pure, plus ou moins applicable à certains usages. A l'aide de l'hydrotimètre, on peut du reste déterminer, ce qu'il est utile de connaître dans beaucoup de circonstances, les proportions de carbonate de chaux, de sulfate de chaux ou autres sels calcaires, de sels de magnésie et d'acide carbonique contenues dans l'eau qu'on examine. (Voir, pour ces déterminations, l'*Hydrotimétrie*, par MM .Boutron et Boudet.)

Ajoutons à ce qui précède quelques renseignements que nous extrayons d'un travail de M. Robinet, rapporteur de la commission d'enquête du département de la Seine, publié en 1862 pour servir de réponse aux adversaires des projets de la ville de Paris.

« Les bonnes eaux potables marquent de 7 à 20 et même 25 degrés; telles sont la plupart des eaux de sources et de rivières.

« Les eaux de puits marquent de 20 à 25 et même 100 degrés et plus; mais ce qui les caractérise surtout, c'est la propriété de réduire le savon en grumeaux, de le coaguler. Comme on sait, beaucoup de ces eaux sont plus ou moins impropres à servir de boisson; quelquefois même elles ne peuvent pas être bues du tout, et ne sont utilisées que pour l'arrosage ou l'entretien de la propreté du sol.

« Le tableau qui suit fait connaître les degrés hydrotimétriques des eaux principales que les Parisiens ont à leur disposition, soit dans l'intérieur de la ville, soit dans quelques-unes des campagnes environnantes (l'eau de la Loire n'est pas employée à Paris).

	degrés.		degrés.		degrés.		degrés.
Loire.	7	Dhuis. . . .	23	Arcueil. . . .	37	Montretout.	60
Puits de Grenelle.	9,50	Ourcq. . . .	31	Ville-d'Avray.	50	Prés-Saint-Gervais . . .	76
Seine.	18 à 21	Chaville. . .	36	Val Fleury. .	50	Puits de Paris (environ).	130
Marne.	19	Garches. . .	36	Meudon. . . .	52	Belleville	155

236. Analyse micrographique. Depuis les travaux de M. Pasteur sur l'influence des microbes dans les fermentations, M. le docteur Miquel a inauguré, à l'Observatoire de Montsouris, l'analyse micrographique de l'eau. Les quantités de bactéries contenues dans les eaux permettent de les classer, au point de vue de leur qualité, en raison inverse du nombre de bactéries.

Dans l'eau de pluie, on trouve en moyenne.	7	microbes	par cent. cube.
— de la Vanne	62	—	—
— de la Seine (Bercy).	1400	—	—
— *id.* (Asnières)	3200	—	—
Dans les eaux d'égout.	20000	—	—

L'eau recueillie à Gennevilliers, après l'irrigation par les eaux d'égout, ne contient plus qu'une vingtaine de microbes par centimètre cube.

237. Jaugeage. Cette opération doit s'effectuer à différentes époques

de l'année, et principalement au moment où les sources ont le moindre débit.

On établit un barrage dans lequel on fait des ouvertures dont le coefficient de la dépense soit connu (140 à 144, 155 et 170), ou encore en opérant comme aux nos 181 et 182.

238. **Citernes.** Dans un grand nombre de localités, les eaux de pluie sont recueillies dans des réservoirs souterrains ou *citernes*. Les eaux de pluie sont, en effet, bonnes pour les bains, le lavage, l'arrosage et diverses opérations industrielles.

Une citerne est le plus souvent recouverte d'une large pierre destinée à la garantir de l'envahissement des sables. On dispose les conduits ou tuyaux qui amènent l'eau dans la citerne, de façon à rejeter les premières eaux qui tombent et qui sont troubles. On recueille ensuite les eaux plus pures. Pour conserver l'eau de pluie dans de bonnes conditions dans les citernes, on doit la maintenir dans l'obscurité, afin d'empêcher le développement des végétaux sous l'influence de la lumière.

La *Semaine des Constructeurs* a publié (10e vol., ann. 1885-86, p. 392, 412, 424, 435 et 461) une série d'articles de M. C. Détain, indiquant les précautions à prendre dans la construction des citernes.

239. **Réservoirs.** On ne peut, en général, assurer le service d'une distribution d'eau qu'en faisant partir cette distribution d'un réservoir dans lequel on recueille pendant la nuit et pendant les intermittences du service de jour le produit des sources ou des machines. De plus, si l'alimentation est faite par des machines, il faut prévoir le chômage en cas de réparation, en donnant aux réservoirs une capacité suffisante pour contenir le volume d'eau dépensé pendant un ou même deux jours.

Un réservoir doit toujours pouvoir se nettoyer. C'est surtout quand il est creusé en terre que cela est difficile, et, cependant, s'il était peu profond, l'eau s'y échaufferait, se remplirait d'insectes et finirait par se corrompre. En lui donnant une grande profondeur on atténuerait ces inconvénients, mais la perte de charge pourrait devenir trop grande quand le niveau s'abaisserait beaucoup.

Les réservoirs peuvent être couverts ou découverts. Dans ce dernier cas, les mousses et les plantes aquatiques qui s'y développent rapidement exigent des nettoyages fréquents; les insectes y abondent. Les eaux exposées à l'air se refroidissent en hiver, s'échauffent en été et sont désagréables à la boisson; de plus, comme la température peut varier de 0° à 20 ou 25°, les conduites en éprouvent des dilatations et contractions successives qui produisent des fuites par les joints.

Dans les réservoirs couverts, l'égalité de température se maintient, et les eaux coulant souterrainement conservent, à 2 ou 3 degrés près, la même température qu'à leur point de départ. Les petits réservoirs peuvent être couverts par des toits ou des combles ordinaires; mais comme ce système de couverture ne met qu'imparfaitement l'eau à l'abri des variations de température, il est presque toujours préférable d'avoir recours aux voûtes en maçonnerie. Comme, pour la conservation

de sa salubrité, l'eau doit être en contact avec l'air convenablement renouvelé, la couverture des réservoirs doit être percée d'ouvertures suffisantes pour la ventilation.

Il suffit, en général, que les réservoirs puissent emmagasiner le débit d'un jour. On les place sur le point culminant de la ville ou du quartier qu'ils doivent desservir. Il convient de les partager en deux parties indépendantes par une cloison transversale, afin que le service ne soit pas interrompu en cas de réparation. Pour les couvrir, on emploie avec avantage des voûtes légères en briquettes et ciment (page 246).

On doit, autant que possible, les disposer en *déblai*. Le fond n'a alors généralement besoin que d'une épaisseur très minime, c'est plutôt un enduit qu'une maçonnerie. Si le terrain est perméable, on le recouvre d'un corroi en glaise battue avec du gravier; puis on étend une couche de béton de $0^m,15$ à $0^m,20$. Quant à l'enceinte, on peut se contenter d'une couche semblable à celle du fond ou d'un perré maçonné, si l'étendue du terrain le permet; dans le cas contraire, on a recours à des murs verticaux ou à parois légèrement inclinées, en leur donnant une épaisseur suffisante pour résister à la poussée des terres, soit environ 1/3 de la hauteur (voir 7e partie). Toutes les parois intérieures se recouvrent d'un enduit en ciment de $0^m,02$ à $0^m,03$ d'épaisseur.

Pour les réservoirs construits hors du sol, si ce sol est solide, le radier est formé d'une couche de béton de $0^m,30$ à $0^m,40$ suivant la hauteur d'eau. On peut, du reste, toujours assimiler un radier à un solide encastré à ses deux extrémités sous les murs d'enceinte, et sollicité uniformément, sous toute sa surface inférieure, par la différence de pression entre son propre poids agissant de haut en bas, et celui d'une colonne d'eau qui tend à le soulever; on peut admettre que cette colonne d'eau est égale à la hauteur d'eau dans le réservoir, en supposant que les infiltrations viennent établir une sous-pression et tendre à soulever la couche de béton.

Si le terrain est mobile ou s'il a été remué, il pourra être nécessaire d'établir le radier sur des voûtes d'arête reposant sur le sol naturel taillé en forme de cintre, et sur des piliers en maçonnerie descendant jusqu'au terrain solide.

L'épaisseur moyenne des murs d'enceinte doit être à peu près la moitié de la hauteur d'eau à soutenir (*Septième partie*).

Quand rien ne s'y oppose, on doit donner la préférence à la forme rectangulaire, en prenant la dimension perpendiculaire à la cloison de séparation, de manière que sa longueur soit à celle de cette cloison dans le rapport de 3 à 2; cette disposition conduit à la moindre dépense de construction. La cloison intérieure a une épaisseur à peu près égale à celle des murs d'enceinte, afin qu'elle puisse résister à la poussée de l'eau quand l'un des compartiments est vide.

Chaque compartiment d'un réservoir doit être percé d'au moins 3 orifices :

1° Un de décharge permettant de rejeter les eaux sales à l'extérieur et de vider promptement ce réservoir en cas de besoin; le fond du radier doit avoir une pente légère vers cet orifice, que l'on garnit d'une bonde de fond ou d'un robinet-vanne;

2° Un orifice d'arrivée communiquant avec la conduite d'amenée, et qui débouche près du fond du réservoir quand cette conduite est en même temps conduite de départ. On le ferme par une bonde qu'on manœuvre de l'extérieur, ou bien on place sur la conduite d'amenée un robinet-vanne faisant le même effet

Souvent, on fait déboucher la conduite d'arrivée au-dessus du réservoir, surtout quand l'eau est fournie par une machine à laquelle on tient à faire faire un travail constant. Dans ce cas, on a un orifice spécial de départ près du fond; cet orifice est fermé par une bonde et par un robinet-vanne placé sur la conduite à peu de distance du réservoir; ce robinet permet de suppléer à la bonde s'il y a lieu.

Il convient que les orifices de prise d'eau, à l'opposé de ceux de décharge, soient placés à 0m,40 ou 0m,50 au-dessus du fond, afin qu'ils ne donnent pas écoulement aux dépôts solides qui ont pu se faire dans le réservoir.

3° Un orifice de trop-plein, que l'on met en communication avec la conduite de décharge.

240. Robinet d'arrêt et de décharge. La plupart des travaux à faire sur les conduites, tels que réparations, branchements, etc., exigent qu'elles soient mises complètement à sec; il faut donc pouvoir interrompre l'arrivée de l'eau dans la portion de conduite à réparer et faire écouler celle qui y est contenue.

A cet effet, il est indispensable d'avoir au moins un robinet d'arrêt à l'origine de la distribution et un robinet de décharge à chaque point bas de la conduite. Comme avec un seul robinet d'arrêt la distribution tout entière serait interrompue à chaque travail, et qu'en outre, on perdrait une grande quantité d'eau, on place de distance en distance un robinet d'arrêt, ce qui permet d'isoler une partie de la conduite, de la vider, et de n'interrompre le service que sur une petite portion de la distribution. Puisque chaque point bas doit être muni d'un robinet de décharge, et que, d'un autre côté, il faut qu'il y ait un de ces robinets entre deux robinets d'arrêt, on voit que ces derniers devront, en général, être placés sur les sommets. Si une conduite est en pente continue sur une grande étendue, il convient d'y placer un robinet d'arrêt tous les 7 à 800 mètres, en mettant évidemment dans ce cas chaque robinet de décharge immédiatement en amont du robinet d'arrêt d'aval. Pour les mêmes raisons que pour la conduite principale, chaque conduite secondaire doit être munie d'un robinet d'arrêt à son origine près de la conduite principale, et si elle est importante, en un certain nombre de points de sa longueur.

Les robinets d'arrêt doivent avoir à peu près le diamètre des conduites. Quant aux robinets de décharge, on proportionne leur orifice de manière que la vidange de l'eau contenue entre les deux robinets d'arrêt voisins s'effectue en une demi-heure ou trois quarts d'heure au plus.

Si deux conduites principales, partant d'un même réservoir, se dirigent dans la ville de manière à faire chacune à peu près le même service, les conduites secondaires doivent autant que possible communiquer avec les deux conduites principales, et il convient qu'il y ait des robinets d'arrêt à leurs embranchements, afin qu'en fermant leur communication avec une partie de conduite mise en décharge, elles puissent être alimentées par l'autre conduite principale. La partie de ville privée d'eau se trouve ainsi réduite autant que possible.

241. Service des eaux à Paris. *Statistique générale.* La pénurie d'eau

engendrant la malpropreté, et la mauvaise eau prédisposant aux maladies, se procurer une eau salubre en quantité suffisante est le problème à résoudre par l'édilité de chaque cité (234).

D'après les statistiques officielles (année 1889), le réseau des voies publiques de Paris a un développement de 949506 mètres, dont 236019 mètres plantés d'arbres, sillonnant une surface de 7802 hectares.

De 26 kilomètres, en 1789, la longueur totale des galeries souterraines de Paris a passé, en 1889, à 867 et même à 1 240 kilomètres, si l'on tient compte des branchements de bouche, de regard et des branchements particuliers destinés à relier les maisons aux égouts publics.

En 1800, la ville de Paris disposait seulement de 15 litres d'eau par habitant et par jour; en 1861, Paris disposait de 67 litres: en 1881, de 165 litres. Actuellement (1890), Paris a à sa disposition 618000 mètres cubes d'eau par jour, ce qui fait à peu près 254 litres par habitant et par 24 heures, chiffre très au-dessous de celui qu'il faudrait atteindre pour satisfaire, suivant les conditions d'une bonne hygiène, à la fois aux besoins privés et aux nécessités du service public. On peut évaluer à 1 000 litres par 24 heures et par habitant le volume d'eau qu'il serait désirable de fournir à la ville de Paris. Ce chiffre est déjà atteint et même dépassé par quelques grandes villes (233). Marseille, depuis les travaux de Mont-Richer pour la dérivation de la Durance, dispose de plus de 1 000 litres par jour, par tête d'habitant; New-York peut en faire autant, depuis que les travaux de l'aqueduc du Croton ont été achevés (1890).

Sur cette consommation totale de 618000 mètres cubes, pour Paris, on en compte environ 145000 d'eau de source; le reste comprend des eaux plus ou moins contaminées, prises à l'amont de Paris, comme celles de la Seine, de la Marne et de l'Ourcq.

A l'origine, Paris puisait sur son territoire ou dans les environs l'eau nécessaire à sa consommation. L'ancien aqueduc d'Arcueil, — reconstruit au XVIIe siècle, — et qui draine les plateaux de Rungis, Paray, Wissous, Fresnes et Longjumeau, au sud de la ville, date de Constance Chlore (commencement du IVe siècle, après J.-C.), qui le fit établir pour alimenter son palais des Thermes (252).

Les sources du nord (Prés-Saint-Gervais, Belleville) n'ont guère été canalisées qu'au VIIe siècle, par les moines de l'abbaye de Saint-Laurent, qui les amenèrent en aqueduc souterrain jusqu'à la fontaine Saint-Lazare, pour arroser leur domaine.

Plus tard, la ville, en s'agrandissant, dut aller chercher plus loin l'eau nécessaire à ses besoins croissants. L'idée d'amener l'Ourcq à Paris appartient à Riquet, l'illustre ingénieur du canal du Languedoc (XVIIe siècle); elle ne fut mise à exécution par Girard, que lorsque Napoléon le chargea de ce travail, en 1812. Le canal de l'Ourcq fut achevé en 1824 (249).

Les eaux de la Beuvronne ont été introduites en 1809 dans les conduites de la ville.

L'aqueduc de la Dhuis, qui nous amène les eaux du département de l'Aisne, a été terminé en 1863 (254).

L'usine hydraulique d'Isle-les-Meldeuses, sur la Marne (à 12 kilomètres en amont de Meaux) et celles de Trilbardou (à 8 kilomètres en aval de la même ville) datent de 1868 (250).

Enfin, l'aqueduc de la Vanne, qui nous fournit l'eau si appréciée du département de l'Aube, remonte à 1873 (257).

D'autres dérivations ont été étudiées depuis; celles de l'Avre et de la Vigne (Eure-et-Loir), par exemple, dont les travaux ont été commencés en 1890, et qui doit apporter à Paris 60 000 nouveaux mètres cubes d'eau potable, et porter ainsi sa quantité totale de 145 à 205 000 mètres cubes d'eau de source (258).

Depuis que les eaux de la Dhuis et celles de la Vanne ont été distribuées dans Paris, on a pu restreindre l'emploi des eaux de canaux, de rivières et d'autres provenances aux divers services publics, tels que fontaines jaillissantes, squares, jardins, parcs, arrosage des chaussées et des plantations, lavage des égouts, des ruisseaux et des urinoirs, etc., sauf les cas de force majeure (246).

On consacre exclusivement aux usages domestiques les 145 000 mètres cubes d'eau de source qui alimentent Paris, et dont voici le détail exact pour l'année 1889 :

Dhuis	6818460 m. c. par an, ou		18681 m. c. par jour.	
Vanne et Cochepies	43458200	—	119064	—
Sources du sud : Arcueil	359354	—	984	—
Sources du nord : Belleville et Prés-Saint-Gervais)	98099	—	269	—
Total des eaux de source	50734113	—	138998	—

Ce chiffre de 138 998 mètres cubes établit qu'en 1889 on n'a pas utilisé toute l'eau disponible, mais le service privé aurait pu se servir des 145 000 mètres cubes cités plus haut.

Pour le service privé, une eau parfaitement limpide et suffisamment fraîche peut s'élever naturellement jusqu'aux étages supérieurs des maisons. Son prix de revient est moindre que l'eau plus ou moins bien filtrée que nous montait le porteur d'eau d'antan.

Au 1er janvier 1890, il y avait en tout, dans Paris, 84 083 propriétés bâties. La recette prévue de l'octroi de Paris, pour 1889, était de 140 246 438f,45.

242. *Extrait du traité conclu, le* 11 *juillet* 1860, *entre la ville de Paris et la Compagnie générale des eaux, modifié par les conventions arrêtées les* 26 *décembre* 1867 *et* 20 *mars* 1880.

La Compagnie des eaux cède en toute propriété à la Ville les terrains, bâtiments, machines, conduites, réservoirs et matériel de toute sorte qu'elle possède dans le département de la Seine.

La Ville paye à la Compagnie une annuité de 1 160 000 francs pendant cinquante années, qui ont commencé à courir le 1er janvier 1861.

La Ville confère à la Compagnie, jusqu'au 1er janvier 1911, la régie intéressée de ses eaux de toute provenance, pour le service des concessions particulières, pendant cinquante années, tant dans le nouveau Paris que dans les communes demeurées, en totalité ou en partie, en dehors de l'enceinte des fortifications.

La Ville prend, à ses frais, les mesures qu'elle juge les meilleures pour continuer et améliorer l'approvisionnement de Paris et de la banlieue en eau propre aux usages domestiques. Elle entretient et complète, également à ses frais et comme elle l'entend, les canaux, machines élévatoires, réservoirs, conduites et autres ouvrages nécessaires à la distribution des eaux. Par dérogation à cet article, la Compagnie est chargée, depuis le 1er janvier 1881, de l'exécution et de l'entretien des travaux de la prise d'eau, aussi bien que du branchement jusqu'à la façade des habitations, sous la surveillance et le contrôle des agents de la Ville.

La Ville continue à avoir toute liberté d'affecter aux services publics et aux concessions faites ou à faire aux établissements départementaux, municipaux ou hospitaliers telle quantité d'eau qu'elle reconnaît utile de déterminer.

Conformément à l'arrêté du conseil d'État en date du 24 juin 1858, la Ville continue à livrer l'eau gratuitement aux établissements de l'État.

Le service de la régie intéressée ne comprend que les quantités d'eau qui excèdent journellement les besoins des services publics.

Les fontaines marchandes sont mises, par la Ville, gratuitement à la disposition de la Compagnie.

La Compagnie traite directement avec les habitants compris dans l'enceinte de Paris, et conclut les abonnements d'après le tarif donné plus loin (243).

La Compagnie est chargée de toutes les opérations de recette, mais elle doit verser, chaque semaine, à la caisse municipale les sommes qu'elle encaisse. Les recettes provenant des établissements communaux sont perçues par la caisse municipale et non par la Compagnie.

Lorsque la recette totale effectuée par la Compagnie dépassera annuellement 3 600 000 francs, il lui sera alloué, sur les sommes excédant ce chiffre de recette, une prime réglée, savoir :

De 3 600 000 à 6 000 000 fr. exclusivement.	25 p. 100
Sur les 7e, 8e et 9e millions.	20
Sur les 10e et 11e millions	15
Sur le 12e million.	10
Sur les recettes supérieures à 12 millions	5

Consommation et vente de l'eau, à Paris. L'eau de source distribuée à Paris suffit à peu près pendant dix mois de l'année. L'été, le volume fourni n'est insuffisant que durant deux mois (juillet et août). La Ville est alors obligée de supprimer momentanément dans une partie du réseau l'alimentation en eau de source et d'y substituer l'eau de Seine, prise à Ivry. Cette substitution se fait pour un temps de une ou deux semaines dans une région déterminée de Paris, comprenant une série de plusieurs

arrondissements, en alternant les arrondissements. Il est regrettable qu'il en soit encore ainsi, et il faudra encore plusieurs années pour assurer dans tout Paris de l'eau de source pour toutes les saisons.

A Paris, l'eau de source est fournie par abonnement par l'intermédiaire de la Compagnie générale des eaux. Elle est vendue aussi par les fontaines dites *marchandes* à raison d'une seule fontaine par arrondissement. Dans ces fontaines, on peut se procurer de l'eau de source toute l'année (245).

L'eau de rivière est fournie par attachement pour des cas spéciaux : constructions ou besoins temporaires.

243. Tarif des abonnements aux eaux de Paris, appliqué depuis le 1er janvier 1881.

§ Ier. — MODES D'ABONNEMENT.

Art. 1er. *Forme des abonnements.* Les abonnements partent des 1er janvier, 1er avril, 1er juillet et 1er octobre de chaque année. La durée est d'une année pour les abonnements jaugés ou au compteur, et de trois mois pour les abonnements d'appartement.

Art. 2. *Mode des abonnements des eaux.* Le mode de délivrance des eaux sera appliqué par la Compagnie, selon les circonstances spéciales, au service qu'il s'agira d'établir. Il aura lieu d'après l'un des systèmes suivants :

1° Par écoulement constant ou intermittent, régulier ou irrégulier, réglé par un robinet de jauge dont les agents de la Compagnie auront seuls la clef. Dans ce mode de livraison, les eaux seront reçues dans un réservoir dont la hauteur sera indiquée par les agents de la Compagnie et déversées par un robinet muni d'un flotteur.

2° Par estimation et sans jaugeage. Ce mode de distribution n'est applicable d'une manière générale qu'aux eaux de source ou autres assimilées.

3° Par compteur.

Art. 3. *Abonnements à robinet libre.* Les abonnements en eaux de source à robinet libre ne sont accordés que pour l'alimentation des appartements habités bourgeoisement. Ces abonnements, destinés uniquement aux usages domestiques, ne sont pas applicables aux appartements dans lesquels s'exerce un commerce ou une industrie donnant lieu à l'emploi de l'eau.

Art. 4. *Tarif des abonnements à robinet libre.* Le tarif de ces abonnements d'appartement sera réglé de la manière suivante :

Un seul robinet établi au-dessus de la pierre d'évier dans un appartement habité par une, deux ou trois personnes	16 fr. 20 par an.
Par chaque personne en plus	4 » —
Par chaque robinet supplémentaire que l'abonné voudra placer dans les appartements :	
Dans les cabinets d'aisances	4 » —
Dans les salles de bain	12 » —
Dans les salles de douche	9 » —
Dans les autres parties de l'appartement	6 » —

Lorsqu'il y aura, dans les appartements abonnés, des employés ou des ouvriers y travaillant, mais ne logeant pas, il sera payé, pour chaque personne de cette catégorie, un supplément de 60 centimes par an.

Les enfants au-dessous de sept ans ne paieront que pour moitié, soit 2 francs par an.

L'abonnement à robinet libre est formellement interdit pour alimenter des jets d'eau, aquariums, ou tous autres écoulements continus.

Toute contravention de ce genre sera constatée par procès-verbal, pour ensuite être statué ce que de droit

Art. 5. *Robinets établis après la signature de la police.* Si le concessionnaire,

pendant le cours de la concession, désire faire établir de nouveaux robinets ne figurant point sur la police d'abonnement, il devra, afin de faire entreprendre ces travaux, en donner avis par lettre adressée au directeur de la Compagnie, afin qu'une nouvelle police, comprenant le service de cette installation, soit présentée à sa signature.

L'augmentation résultant de cette nouvelle installation devra être payée par l'abonné à partir du jour de la pose des robinets, quelle que soit d'ailleurs la date de l'entrée en jouissance fixée par la nouvelle police, et que les nouveaux robinets soient ou ne soient pas utilisés immédiatement après leur établissement.

Dans le cas où l'abonné négligerait de donner l'avis prescrit ci-dessus, les nouveaux robinets seront considérés comme existant depuis le commencement de l'abonnement, et l'augmentation résultant de leur installation sera payée à la Compagnie à partir de cette dernière date, qui sera donnée par la police en cours.

Tout robinet supplémentaire supprimé devra également être signalé par lettre adressée au directeur de la Compagnie, qui en accusera réception Le prix afférent à ce robinet ne sera déduit du montant de la police qu'à partir du premier jour du trimestre qui suivra la lettre d'avis, quelle que soit d'ailleurs la date de la suppression du robinet.

Art. 6. *Robinets de palier.* Pour les étages dans lesquels il n'y aura pas de logement d une valeur réelle de location dépassant 500 francs par an, les propriétaires pourront faire établir un robinet de palier dont ils disposeront, exclusivement, au profit des locataires habitant l'étage où sera établi ce robinet, et n'y exerçant ni commerce ni industrie donnant lieu à l'emploi de l'eau.

Toutefois, dans le cas où il y aurait dans l'immeuble d'autres étages dans les conditions sus-indiquées, le robinet de palier ne pourra être accordé que si le propriétaire consent à en établir à chacun de ses étages.

Il est bien entendu que, dans le cas prévu par le présent article, ces robinets ne pourront être placés que sur l'un des paliers et non dans l'un des appartements.

Le prix à payer pour l'usage de chaque robinet ainsi établi sera de 16f,20 par an.

Art. 7. Dans les abonnements à robinet libre, tous les robinets de puisage placés dans les cuisines et dans les cabinets d'aisances devront être munis d'un appareil à repoussoir et devront être d'un des modèles acceptés par l'administration.

Ces robinets ne devront point produire de coups de bélier et ils ne devront pouvoir être tenus ouverts autrement qu'à la main.

Art 8. *Abonnements jaugés ou au compteur.* En dehors des deux modes d'abonnement sus-indiqués, l'eau ne sera plus fournie, à dater du 1er janvier 1881, que par des abonnements au compteur ou au robinet de jauge.

L'eau utilisée directement comme force motrice ne sera livrée qu'au moyen d'un abonnement au compteur.

Toutefois les propriétaires des établissements de bains publics qui ne voudront pas s'abonner au compteur, auront la faculté de s'abonner à robinet libre aux conditions suivantes :

L'eau fournie pour les bains sera de l'eau de l'Ourcq, partout où le niveau du sol permet de la distribuer, et des eaux de rivière sur les points inaccessibles aux eaux de l'Ourcq.

Le prix à forfait à payer par ces propriétaires sera calculé sur une moyenne de un bain et demi par jour et par baignoire, affectée tant au service sur place qu'au service à domicile.

Ce prix est fixé pour un bain à 5 centimes.

Les établissements de bains dans lesquels il existera aussi des piscines, des bains de vapeur, des douches, etc., devront avoir, pour cette partie de leur service, une canalisation distincte et un abonnement soit à la jauge, soit au compteur. Dans le cas où ces services ne seraient pas alimentés par les eaux de la Ville, l'abonnement par estimation ne serait pas applicable à l'établissement.

Les abonnements des lavoirs alimentés, suivant le niveau des eaux, soit en eau d'Ourcq, soit en rivière, seront exclusivement à la jauge ou au compteur, et fixés aux prix des abonnements des eaux industrielles indiqués à l'article 24 ci-après (p. 234).

Art. 9. *Interruption des eaux.* Les abonnés ne pourront réclamer aucune indemnité pour les interruptions momentanées du service résultant soit des gelées, des séche-

resses et des réparations des conduites, aqueducs ou réservoirs, soit de toute autre cause analogue.

Dans le cas d'arrêt de l'eau, en totalité ou en partie, l'abonné doit prévenir immédiatement la Compagnie dans un des bureaux établis pour cet usage et dans lesquels sont déposés des registres destinés à inscrire les réclamations.

Toute interruption de service dont la durée excéderait trois jours à dater du jour où la réclamation de l'abonné aura été inscrite dans l'un des bureaux de la Compagnie, donnera droit, pour cet abonné, à une déduction dans le prix des abonnements proportionnelle à tout le temps d'interruption de service qui excédera trois jours.

Il est entendu que toute interruption, quelle qu'en soit la cause, ne peut donner lieu à des indemnités, ni à des dommages-intérêts, autres que la déduction du prix de l'eau non fournie.

§ II. — Colonnes montantes. (Voir p. 237.)

. . . .

Art. 12. Les colonnes montantes ou agencements seront établis dans les cages d'escaliers ou en tout autre endroit plus à proximité des cuisines, mais à l'extérieur des appartements et, autant que possible, à l'abri de la gelée.

Pour éviter l'action des gelées, il est nécessaire que les conduites soient mises en décharge la nuit et ne fonctionnent que pendant le temps rigoureusement nécessaire à l'approvisionnement. Les abonnés qui ne voudront pas tenir compte de cette prescription seront seuls responsables des effets des gelées.

Art. 13. A partir de la colonne montante ou agencement, les tuyaux destinés à la distribution de l'eau dans les appartements ou sur les paliers seront établis par les propriétaires ou les abonnés et par les entrepreneurs de leur choix.

Il pourra être alloué, en outre, une prime de 30 francs à chaque abonné nouveau qui prendra l'eau sur les colonnes montantes ou agencements dans l'année de leur exécution. Cette prime sera payée après l'exécution des travaux de distribution.

. . . .

Art. 15. *Entretien.* Les propriétaires auront la faculté de faire entretenir les colonnes montantes ou agencements établis par la Compagnie ou que celle-ci acceptera, soit par la Compagnie au prix du tarif ci-après, soit par tout autre entrepreneur.

. . . .

§ III. — Prises d'eaux et robinets.

Art. 17. *Unité de l'abonnement. Prises d'eau et robinets.* Chaque propriété particulière devra avoir un branchement séparé avec prise d'eau distincte sur la voie publique.

L'abonné ne pourra conduire tout ou partie de l'eau à laquelle il a droit, dans une propriété qui lui appartiendrait, que dans le cas où celle-ci serait adjacente à la première et aurait une cour commune.

A la fin de l'abonnement, les robinets d'arrêt et de jauge faits sur le modèle de la Compagnie seront rendus à l'abonné après que la Compagnie aura changé la tête de ces robinets; il en sera de même en cas de remplacement d'un de ces robinets.

Art. 18. *Robinets d'arrêt.* A l'origine de chaque branchement sera placé, sous la voie publique, un robinet d'arrêt sous bouche à clef, dont les agents de la Compagnie auront seuls la clef. Il sera placé de plus un robinet de jauge, en cas d'abonnement au robinet de jauge.

Les abonnés pourront faire placer à l'intérieur de leurs habitations un second robinet d'arrêt, à la condition que la clef dont ils feront usage sera différente de celle de la Compagnie.

Il est interdit aux abonnés, sous peine de poursuites judiciaires, de faire usage des clefs du modèle de celles de la Compagnie ou même de les conserver en dépôt.

Art. 19. Chaque colonne montante sera pourvue d'un robinet d'arrêt. Ce robinet sera plombé ou renfermé dans un coffre fermant à clef, afin qu'il ne puisse être manœuvré, sauf le cas d'accident, que par les agents de la Compagnie.

Dans ce dernier cas, le propriétaire de la colonne montante devra en donner avis à la Compagnie, sans délai, en indiquant le motif qui a nécessité cette manœuvre.

Chaque branchement pris sur la colonne montante sera pourvu aussi d'un robinet de barrage.

Ces robinets seront également plombés et ne devront être manœuvrés, sauf les cas d'accident, que par les agents de la Compagnie.

Toute infraction à cette prescription sera poursuivie par les voies de droit.

Art. 20. *Frais d'embranchement.* Les travaux d'embranchement sur la conduite publique seront exécutés et réparés aux frais de l'abonné et aux prix fixés par le tarif par les ouvriers de la Compagnie, savoir :

Jusqu'au réservoir, dans le cas de distribution à la jauge;

Jusqu'au compteur, dans le cas d'abonnement au compteur;

Jusqu'au mur de face intérieur avec un bout de tuyau en plomb pénétrant de $0^m,50$ dans l'intérieur de la propriété, dans le cas d'abonnement à robinet libre.

L'eau sera livrée aussitôt que le mémoire des travaux à la charge de l'abonné aura été soldé.

Les abonnés qui auront un réservoir dans l'intérieur de la propriété, ou un compteur, pourront faire faire les travaux de distribution intérieure, à partir du réservoir ou du compteur, par des ouvriers de leur choix.

Les travaux de pavage, de trottoirs, seront faits par les soins des ingénieurs du pavé de Paris, aux frais des abonnés, conformément aux dispositions de l'arrêté préfectoral du 29 juillet 1879.

Les abonnés ne pourront s'opposer aux travaux d'entretien et de réparation des tuyaux et robinets établis pour le service de leurs abonnements, lorsqu'ils auront été reconnus nécessaires.

Tout ancien branchement de prise d'eau devra être pourvu, à son point de jonction avec la conduite publique, d'un robinet d'arrêt, à la première réparation ou modification qu'il aura à subir.

Dans le cas de contestation sur la nécessité de ces travaux, la question sera résolue par l'ingénieur en chef du service municipal, chargé du contrôle du service des eaux.

Les abonnés devront payer les prix de ces travaux, conformément au tarif sus-énoncé, dans le mois qui suivra la notification du mémoire, à peine de fermeture de leur concession, sans préjudice du droit pour la Compagnie d'exercer un recours, s'il y a lieu.

Art. 21. Dans tous les cas où la prise d'eau, soit d'une concession d'établissement public, soit d'un abonnement privé, sera pratiquée sur une conduite publique posée sous galerie, le tuyau alimentaire devra être placé dans le branchement d'égout desservant l'immeuble. Cette mesure sera appliquée immédiatement, si ce branchement existe; sinon, aussitôt que l'égout particulier aura été construit.

Le tuyau devra, pour entrer dans la propriété, pénétrer dans le mur pignon du branchement ou, s'il y a impossibilité, être dévié latéralement sous le trottoir le long de la façade de la propriété. Dans ce cas, il sera contenu dans un fourreau métallique étanche, incliné vers l'égout.

Les travaux prévus aux deux paragraphes ci-dessus seront exécutés, conformément à l'article 20, aux frais de l'abonné, par la Compagnie ou ses entrepreneurs, aux conditions de la série de prix.

Faute de satisfaire à cette prescription, dans le délai de vingt jours à compter de l'invitation qui aura été signifiée à qui de droit par les soins de l'ingénieur en chef du service municipal des eaux, le report sera fait d'office et aux frais de l'abonné.

§ IV. — Compteurs. (Voir p. 237.)

Art. 22. *Fourniture et pose des compteurs.* Les compteurs sont à la charge des abonnés, qui ont la faculté de les acheter parmi les systèmes approuvés par l'administration, la Compagnie entendue.

Les compteurs ainsi achetés ne pourront être mis en service qu'après avoir été vérifiés et poinçonnés par l'administration.

Ils seront soumis, quant à l'exactitude et à la régularité de leur marche, à toutes les vérifications que l'administration et la Compagnie jugeront devoir prescrire.

Les compteurs achetés par les abonnés pourront être posés par leur entrepreneur particulier; mais cette installation, qui sera vérifiée par les agents de la Compagnie, devra être faite conformément aux indications de la police d'abonnement. Le plombage sera fait par les agents de la Compagnie.

Art. 23. *Compteurs en location.* La Compagnie fournira aux abonnés qui en feront la demande des compteurs en location du modèle qu'elle choisira parmi ceux approuvés par l'administration.

Le tarif de location et d'entretien des compteurs est établi sur les bases suivantes :

Prix fixe, par an et par compteur, quel que soit le volume d'eau consommé, 5 francs.

Prix variable s'ajoutant au prix fixe : 15 p. 100 du prix de l'eau consommée pour les quantités inférieures à 1 000 litres.

Au delà et jusqu'à 5 000 litres, 15 p. 100 sur les 1 000 premiers litres, et 6 francs par mètre cube supplémentaire de consommation journalière moyenne.

Au-dessus de 5 000 litres, la Compagnie traite de gré à gré avec les abonnés.

Toutefois, le prix de location et d'entretien ne pourra jamais dépasser 12 p. 100 du prix courant d'acquisition et de pose du modèle des compteurs choisis.

§ V. — Prix de l'eau.

Art. 24. *Usage de l'eau de l'Ourcq.* Les eaux de l'Ourcq sont exclusivement réservées, en dehors des services publics, aux besoins industriels et aux services des écuries, remises, cours et jardins.

Dans les rues où le niveau ne permet pas d'amener les eaux de l'Ourcq, il pourra y être suppléé aux mêmes conditions par les eaux de la Seine, de la Marne ou autres équivalentes, si l'administration le juge convenable et si les immeubles sont d'ailleurs approvisionnés en eaux de source pour les usages désignés aux articles 3 et 6 ci-dessus, de même que si la canalisation le permet.

La Compagnie sera libre de traiter à forfait, sauf approbation de l'administration en cas de contestation, pour les livraisons d'eau par attachement ou par supplément. Dans ce mode de livraison, les prix de vente devront être au moins égaux à ceux des tarifs.

Art. 25. *Tarif de l'eau. Tarifs pour les abonnements jaugés et au compteur.* A partir du 1er janvier 1881, le prix de l'eau sera déterminé d'après le tableau suivant, même pour les polices en cours :

QUANTITÉ DE LA FOURNITURE journalière.	PRIX PAR AN POUR CHAQUE MÈTRE CUBE. Eaux de l'Ourcq et de rivière pour les usages industriels ou pour le service des écuries, cours et jardins.	Eaux de source, de rivière et autres pour les usages domestiques.
	francs	francs
125 litres par jour.	»	20
250 *id.*	»	40
500 *id.*	»	60
1 000 *id.*	60	120
1 500 *id.*	90	180
2 000 *id.*	120	240
2 500 *id.*	150	300
3 000 *id.*	180	360
3 500 *id.*	210	420
4 000 *id.*	240	480
4 500 *id.*	270	540
5 000 *id.*	300	600

Au-dessus de 5 mètres cubes et jusqu'à 10 mètres cubes, mais pour les 5 derniers mètres cubes seulement, les prix seront ainsi fixés :

Pour l'eau de l'Ourcq ou pour les eaux équivalentes désignées à l'article 25 : 50 francs par an et par mètre cube ;

Pour l'eau de source, de rivière et autres, 100 francs par an et par mètre cube.

Au dessus de 10 mètres cubes et jusqu'à 20 mètres cubes, mais pour les 10 derniers mètres cubes seulement, les prix seront évalués :

Pour l'eau de l'Ourcq et pour les eaux équivalentes indiquées à l'article 25 : 40 francs par an et par mètre cube;

Pour l'eau de source, de rivière ou autres, 80 francs par an et par mètre cube.

Au delà de 20 mètres, mais seulement pour les quantités excédantes, la Compagnie traitera de gré à gré sans qu'en aucun cas le prix du mètre cube puisse être inférieur pour les eaux de l'Ourcq et les eaux de source équivalentes à 25 francs, et à 55 francs pour les eaux de source, de rivière et autres.

Ces traités de gré à gré devront d'ailleurs être approuvés par le préfet de la Seine.

Art 26. Il ne sera pas accordé d'abonnement inférieur à 1 000 litres pour les eaux de l'Ourcq ou autres équivalentes, et à 125 litres pour les eaux de source, de rivière et autres.

L'abonné ne pourra réclamer de l'eau d'une origine autre que celle existante dans les conduites placées dans le sol de la voie publique où se trouve la propriété pour laquelle il contracte l'abonnement.

Art. 27. *Paiements*. Le prix de l'abonnement sera payé sur la quittance de la Compagnie, d'avance, aux époques indiquées dans l'engagement du concessionnaire.

L'abonné au compteur devra payer d'avance le montant de son abonnement minimum, tel qu'il est fixé par sa police d'abonnement pour l'année entière.

Chaque mètre cube d'eau consommée en sus de l'abonnement sera payé au prix fixé par la police d'abonnement.

Le volume d'eau consommée sera relevé dans la première quinzaine de chaque trimestre, contradictoirement avec l'abonné, qui devra reconnaître et signer ce relevé.

Le supplément de consommation sera dû à la Compagnie par l'abonné dès que le relevé trimestriel constatera que le montant de l'abonnement minimum sera dépassé.

Dans le cas où la consommation annuelle n'atteindrait pas le chiffre résultant de la police d'abonnement, le prix minimum fixé par cette police n'en sera pas moins acquis intégralement à la Compagnie.

La consommation journalière ne devra d'ailleurs, dans aucun cas, dépasser quatre fois le volume d'eau de l'abonnement souscrit.

A défaut de paiement régulier aux époques ci-dessus, le service des eaux sera suspendu et l'abonnement sera résilié, sans préjudice des poursuites que la Compagnie pourra exercer contre l'abonné, après deux avertissements, à deux jours de date, restés sans effet.

§ VI. — Dispositions générales.

Art. 28. *Dispositions générales. Responsabilité des abonnés*. Les abonnés seront responsables envers les tiers de tous les dommages auxquels l'existence de leurs conduites pourrait donner lieu, sauf recours contre qui de droit. Quant aux dommages causés par l'établissement des conduites, ce sont les entrepreneurs qui en sont forcément responsables.

Art. 29. *Constatation de branchements*. Lors de la mise en jouissance de chaque abonné, il sera dressé contradictoirement entre l'abonné et la Compagnie un état de lieux indiquant la nature, la disposition et le diamètre des conduites, savoir :

De la conduite publique au réservoir, dans le cas d'abonnement jaugé;

De la conduite publique au compteur, dans le cas d'abonnement au compteur.

Lorsqu'il s'agira d'un abonnement d'appartement, l'état de lieux comprendra en plus la canalisation de distribution intérieure, ainsi que le nombre et l'emplacement des robinets et orifices d'écoulement.

L'abonné ne pourra rien changer aux dispositions primitivement arrêtées, à moins d'en avoir préalablement obtenu l'autorisation de la Compagnie.

Art. 30. *Interdiction de céder les eaux*. Il est formellement interdit à tout abonné de laisser embrancher sur sa conduite, soit à l'intérieur, soit à l'extérieur, aucune prise d'eau au profit d'un tiers.

Les eaux de la Ville de Paris étant des eaux publiques, inaliénables et imprescriptibles et ne pouvant faire l'objet d'un commerce, ne sont concédées aux habitants qu'à

la condition de n'en disposer que pour leur usage personnel ou celui de leurs locataires; il est donc interdit à l'abonné de disposer, ni gratuitement, ni à prix d'argent, ni à quel titre qne ce soit, en faveur de tout autre particulier ou intermédiaire de la totalité ou d'une partie des eaux qui lui sont fournies, d'après sa police d'abonnement, ni même du trop-plein de son réservoir.

L'abonné ne pourra non plus augmenter à son profit le volume de son abonnement.

Art. 31. *Surveillance.* La distribution d'eau pratiquée dans l'intérieur des propriétés particulières et dans les appartements sera constamment soumise à l'inspection des agents de la Compagnie et de la Ville, sous peine de fermeture de la concession. Ces agents pourront établir aux frais de l'administration, et sur le branchement de chaque abonné, un compteur qui lui permettra de constater, au besoin, la consommation réelle de l'abonné.

Art. 32. *Interdiction de rémunération aux agents de service.* Il est interdit aux abonnés et à tous les ayants droit de rémunérer, sous quelque prétexte et sous quelque dénomination que ce puisse être, aucun agent de l'administration ou de la Compagnie.

Art. 33. *Infraction à l'usage de l'eau défini à la police.* Toute infraction aux dispositions du présent règlement en ce qui concerne l'usage de l'eau tel qu'il est défini à la police d'abonnement, entraînera l'obligation pour l'abonné de payer, à titre de dommages-intérêts, une indemnité de 300 francs, et les causes de cette pénalité devront disparaître dans un délai maximum de quinze jours, sous peine de fermeture de la concession, jusqu'à ce que l'abonné ait consenti à se conformer aux dispositions réglementaires, soit en signant une nouvelle police d'abonnement, soit en faisant disparaître les causes de l'infraction ou de la contravention constatée par procès-verbal.

Lorsque les eaux concédées pour un usage industriel auront été employées à des usages domestiques, cette contravention entraînera pour les particuliers, outre les pénalités ci-dessus stipulées, l'application du tarif des eaux de source, de rivière et autres pour les usages domestiques indiqué à l'article 25.

Art. 34. *Résiliation.* Les parties pourront renoncer à la continuation du service des abonnements, en s'avertissant réciproquement d'avance, savoir :

Au bout de la première année, de trois mois en trois mois, s'il s'agit d'abonnement annuel;

Au bout du premier trimestre, de mois en mois, s'il s'agit d'abonnement trimestriel.

Quelle que soit l'époque de l'avertissement, le prix de l'abonnement sera exigible jusqu'à son expiration.

Art. 35. *Mutation de propriété.* L'abonnement ne sera pas résilié par le seul fait de la mutation de la propriété ou de l'établissement dans lequel les eaux sont fournies.

L'abonné ou ses héritiers seront responsables du prix de l'abonnement jusqu'à ce qu'ils aient accompli la formalité exigée par l'article 34, sans préjudice du recours contre le successeur qui aura joui des eaux.

Art. 36. *Suppression des appareils de distribution en cas de résiliation.* Dès la résiliation d'un abonnement et si l'abonné est propriétaire du branchement, la Compagnie devra faire couper et détacher le tuyau de concession près de son point de jonction avec la conduite publique, en conservant toutefois le collier pour maintenir la plaque pleine sur l'orifice de la prise d'eau.

Ce travail, ainsi que toutes fouilles et tous raccordements seront exécutés d'office et aux frais du propriétaire du branchement, par les soins de la Compagnie générale des eaux.

A la suite de l'opération effectuée par la Compagnie, le propriétaire du branchement aura la faculté d'enlever les robinets d'arrêt, bouches à clef et autres agrès de prise et de distribution d'eau, sauf le collier, en se conformant aux prescriptions du paragraphe 3 de l'article 17 ci-dessus.

En tout cas, il restera responsable des conséquences qui pourraient résulter de l'existence des agrès qu'il laisserait, soit à l'intérieur, soit même sous la voie publique.

La Compagnie tiendra attachement de ces dépenses qui lui seront, d'après ses mémoires dûment réglés, remboursées par le propriétaire du branchement, ou à son

défaut par le nouvel abonné qui déclarera dans la police vouloir profiter de l'ancienne prise d'eau.

La remise en service du branchement n'aura lieu qu'après ce remboursement.

. . . .

Arrêté réglementaire pour les compteurs d'eau (1880). Nous ne pouvons donner en son entier le texte de l'arrêté qui a été pris par le préfet de la Seine pour réglementer l'usage des compteurs d'eau; nous en donnerons seulement quelques extraits.

Les systèmes de compteurs admis par la Ville sont les suivants :

Compteur à un cylindre, système Kennedy;

Compteur à deux cylindres, système Frager;

Compteur à trois cylindres, système Desplechin-Mathelin;

Compteur à quatre cylindres, système Samain.

Aucun changement ne devra être apporté aux dispositions actuelles de ces appareils, sans l'autorisation du service des eaux.

Un système quelconque, actuellement en service, sera toléré et pourra être réparé, jusqu'à ce qu'il soit hors de service.

Néanmoins, tout compteur qui laissera passer 30 litres à l'heure sans enregistrement devra être remplacé par un compteur d'un des systèmes désignés ci-dessus comme admis.

D'autres types de compteurs pourront être essayés par la Ville, et admis. Un compteur admis et dont la pratique viendrait à démontrer l'imperfection pourrait être l'objet d'un retrait d'autorisation.

Depuis 1885, la ville de Paris se charge de poser, à ses frais, les conduites d'eau dans les voies non classées, toutes les fois que les propriétaires riverains lui en font la demande. Il suffit que cette demande contienne l'engagement de supporter l'existence de la conduite sous la voie et de souscrire des abonnements d'eau représentant ensemble 1/5 de la dépense des travaux d'établissement de la conduite.

Les propriétaires, qu'il s'agisse d'une voie publique ou d'une voie privée, peuvent obtenir l'établissement gratuit des colonnes montantes dans leurs maisons, à la seule condition de souscrire un abonnement de 16f,20 par étage, au lieu de 32f,40 comme le portait l'ancien règlement. Grâce à ces mesures, tout propriétaire peut faire établir, à très peu de frais, un robinet libre sur le palier de chaque étage de sa maison et mettre à la disposition des locataires, moyennant une dépense de 16f,20 par étage, toute l'eau nécessaire aux ménages qui y habitent.

244. En 1889, sur 84 000 immeubles existant à Paris, 69 755 étaient abonnés à la Compagnie des eaux, parmi lesquels 53 544 au compteur, 12 532 à la jauge et 2 105 à robinet libre. En quelques années le compteur a pris la place du robinet libre; celui-ci portait, en effet, en 1878, sur plus de 26 000 polices.

Le nombre des abonnements s'élève de 2 000 à 2 500 par an. Des abaissements de tarif votés à diverses reprises par le conseil municipal depuis 1870 hâtent encore le mouvement.

Le revenu annuel de la Compagnie des eaux est évalué, pour Paris,

à 11 millions de francs. Les dépenses sont de 4 à 5 millions. Le capital engagé est très élevé.

245. *Tarif de la vente de l'eau dans les fontaines marchandes* (*Arrêté préfectoral du 26 janvier* 1865).

CAPACITÉ DES TONNEAUX.	PRIX
De toute quantité inférieure à 150 litres	0f,10
De 150 litres à 200 litres exclusivement	0 ,15
De 200 — 250 — *id.*	0 ,20
De 250 — 300 — *id.*	0 ,25
Et ainsi de suite.	
Le prix du puisage est de 1 centime par seau.	

246. **Service public de Paris**. Actuellement, le service privé dispose de 145000 mètres cubes par jour (p. 228) et les services publics et la grande industrie forment un total de 473000 mètres cubes, qui sont puisés aux points suivants :

Anciennes dérivations et puits artésiens	9000 m. c. par jour.	
Canal de l'Ourcq (1)	134000	—
Usines élévatoires. Seine	240000	—
Usines élévatoires. Marne	90000	—
Total	473000 m. c.	
En ajoutant les eaux de source	145000	—
On obtient le cube total de	**618000 m. c.** (p. 227)	

d'eau disponible pour Paris (maximum).

Ce qui fait plus de 225 millions de mètres cubes par an.

Paris renferme en outre 30000 puits fournissant une eau séléniteuse (contenant du sulfate de chaux), marquant jusqu'à 200° hydrotimétriques. Elle doit être rejetée pour l'alimentation.

Une grande partie de la masse d'eau que nous venons de dénombrer est, avant sa distribution, reçue dans des bassins disséminés sur les points culminants, et dont les principaux sont indiqués dans le tableau suivant :

247. *Capacité de quelques réservoirs :*

De Montsouris ou de Montrouge (recevant les eaux de la Vanne)	305000mc
De Ménilmontant (recevant les eaux de la Dhuis)	100000
Des Buttes-Chaumont	8800
Du Panthéon (3 bassins découverts)	3800
Saint-Victor (2 bassins)	7000
Racine (3 bassins)	5800
De Vaugirard (2 bassins)	8900
De Monceau	10000
De Passy : 1° un bassin inférieur reposant sur le sol, 11300mc ; 2° un bassin supérieur superposé au premier, et qui est recouvert d'une voûte légère, 6200mc ; 3° un bassin inférieur, 10000mc ; 4° un bassin découvert superposé au précédent, 5700mc ; 5° un bassin de réserve, reposant sur le sol et découvert, 3900mc	37100

(1) Les usines de l'Isle les-Meldeuses et de Trilbardou (Seine-et-Marne) puisent l'eau dans la Marne pour la verser ensuite dans le canal de l'Ourcq (250).

De Charonne	49000
De Villejuif	25000
De Grenelle	6500
De Montmartre (1er compartiment)	6500
— (2e compartiment)	4500
Du cimetière de Passy	2600
De Gentilly (2 compartiments)	12000

Des bassins tels que ceux du Panthéon et de Passy, alimentés en eau de Seine, sont curés régulièrement tous les trois mois.

Les nouveaux réservoirs de Montmartre, achevés en 1889 (11000 mètres cubes), élèvent l'eau à la cote 75; une partie provient de la Dhuis, l'autre de la Seine (à Bercy). Ces réservoirs ont coûté 1 million, dont 970000 francs pour les terrassements et les maçonneries.

248. Répartition de l'eau à Paris. Le projet complet de l'alimentation de Paris comprendra, lorsqu'il sera terminé, une double canalisation : un service public et un service privé. Elle fonctionne déjà dans un grand nombre de quartiers. Cette double canalisation a deux affectations distinctes : l'une, l'alimentation de la Ville avec les eaux du canal de l'Ourcq et celles de la Seine; l'autre, l'alimentation en eau de source. L'outillage hydraulique de la capitale se compose de quatorze usines élévatoires, munies de vingt-neuf machines à vapeur et de dix-huit moteurs hydrauliques, représentant une force de 4350 chevaux. Il y a quinze réservoirs en maçonnerie (247) formant un cube de 600000 mètres cubes environ (1).

C'est à l'ingénieur Belgrand que l'on doit l'idée de la double canalisation et la division du service des eaux en trois sections : le bas service, le service moyen et le haut service, suivant l'altitude des points à desservir.

Aussi bien pour le service privé que pour le service public, Paris a été divisé en quatorze zones étagées. Chacune d'elles reçoit l'eau par une seule ascension, et la quatrième par machines de relai. Des réservoirs, auxquels aboutissent les tuyaux de refoulement des machines élévatoires, sont répartis aux quatre plans de niveau qui limitent ces étages; ils sont le point de départ des canalisations, et servent de régularisateurs indispensables entre l'alimentation qui est continue, et la distribution qui est intermittente. On leur a donné, en général, des dimensions considérables; le réservoir de Montsouris, qui reçoit les eaux de la Vanne, atteint une capacité de 305000 mètres cubes; il a 3 hectares de superficie.

La répartition entre l'eau de la Vanne, qui dessert environ les 4/5 de la Ville, et l'eau de la Dhuis, qui n'alimente que les quartiers hauts, a été commandée par l'inégalité des cotes auxquelles les dérivations arrivent à Paris (cote 80 et cote 108); le service public est alimenté dans

(1) On pourra consulter, dans les *Annales des ponts et chaussées* (février 1891), une notice sur les travaux de construction d'usines élévatoires et de réservoirs, exécutés de 1880 à 1889, pour améliorer l'alimentation d'eau de Paris, par M. Bechmann, ingénieur en chef.

les parties basses par les eaux de l'Ourcq, dans la région moyenne inférieure par l'eau de Seine, dans la région moyenne supérieure et la région extrême (cote 125) par l'eau de Marne. Le point culminant de la Butte-Montmartre est toutefois desservi, pour tous les usages indistinctement, par un petit réservoir spécial (cote 135,65) qui reçoit les eaux de source.

Dans le centre de Paris, c'est-à-dire dans les quartiers bas, sur les deux rives de la Seine, le service public et industriel se fait au moyen des eaux du canal de l'Ourcq. En outre, l'eau de la Vanne est distribuée aux immeubles construits sur des terrains dont la cote ne dépasse pas 50 mètres. Cette distribution forme le *bas service.*

Dans les quartiers situés à une altitude moyenne, c'est-à-dire entre 50 et 80 mètres, le service se fait par l'eau de Seine, qui fournit trois groupes de réservoirs situés au sud, à l'est et à l'ouest de Paris.

Ces réservoirs sont desservis par des usines élévatoires, réparties sur les deux rives de la Seine. En plus, ces quartiers sont alimentés en eau de source de la Vanne, fournie par le réservoir de Montsouris. Tel est le *service moyen* qui comprend les XVIIIe, XIXe et XXe arrondissements et les parties hautes des VIIIe, IXe, X^e, XIe, XVIe et XVIIe arrondissements.

Dans les quartiers hauts, situés au nord-est de Paris, comprenant Belleville, Montmartre et Ménilmontant, on a installé un *haut service* qui se fait par l'eau de la Marne, au moyen de l'usine de Saint-Maur, se composant de huit machines hydrauliques et de trois machines à vapeur et constituant ensemble une force de 1 200 chevaux-vapeur. Les pompes de Saint-Maur peuvent élever 80 000 mètres cubes d'eau en vingt-quatre heures. Le 1/6 est affecté au service du lac de Gravelle, dans le bois de Vincennes. Les autres 5/6 alimentent les bassins inférieurs de Ménilmontant, situés au-dessous du réservoir des eaux de la Dhuis.

En dehors de ces services, les eaux de source de la Dhuis alimentent les pieds des collines du nord de Paris, au moyen d'usines élévatoires refoulant l'eau de la Dhuis dans des réservoirs installés aux sommets des buttes. Quant aux sommets, ils reçoivent la même eau de source au moyen d'usines qui l'élèvent dans les réservoirs installés sur ces sommets.

D'autre part, une usine élévatoire est affectée au service en eau de la Vanne sur le plateau de Plaisance, et des pompes, établies boulevard de la Villette, élèvent l'eau de la Vanne dans le réservoir inférieur de la Dhuis, à Ménilmontant. De cette manière on peut répartir, suivant les circonstances, les eaux provenant des deux canalisations de la Vanne et de la Dhuis entre les divers quartiers de Paris.

La canalisation n'avait, en 1854, qu'un développement de 54 kilomètres ; aujourd'hui elle a dépassé 2 000 kilomètres; le diamètre des conduites, qui mesurait au maximum 0^m,60, s'élève actuellement jusqu'à 1^m,30 et ne s'abaisse que très exceptionnellement au-dessous de 0^m,10.

Cette canalisation dessert 83 000 branchements dont 17 000 alimentent les appareils de la rue, et 66 000 font le service des immeubles.

Les appareils qui fonctionnent sur la voie publique sont de catégories diverses; ils ont pour objet :

Le lavage des ruisseaux (6 500 bouches);

L'arrosement des voies et plantations (4 500 bouches pour l'arrosage à la lance et 240 appareils de grand débit servant au remplissage des tonneaux);

L'assainissement des urinoirs (3 500 effets d'eau);

L'assainissement des égouts (robinets spéciaux en nombre considérable à l'étude, dont 400 sont déjà établis);

Les secours contre l'incendie (bouches de $0^m,10$ de diamètre, fournissant en moyenne 1 200 litres par minute, dont il existe actuellement 5 000 environ);

L'alimentation du public non abonné (service des fontaines décoratives, cascades, bassins, etc., au nombre de 82).

249. Eau de l'Ourcq. Le canal de l'Ourcq fut construit de 1812 à 1824. Ses eaux contribuent à l'alimentation de Paris, ou plus exactement au service d'assainissement de la ville. Elles arrivent à la Villette dans un bassin à ciel ouvert de 500 000 mètres cubes. La cote d'arrivée est de 52 mètres (au-dessus du niveau moyen de la mer). Du bassin de la Villette, ces eaux s'écoulent dans l'aqueduc de Ceinture, qui aboutit au réservoir de Monceaux, dont la capacité est de 10 000 mètres cubes.

En divers points de l'aqueduc de Ceinture sont branchées de grosses conduites en fonte qui descendent vers la Seine et franchissent les ponts en se relevant sur le versant sud de Paris, à une cote un peu moindre que celle du point de départ. L'eau arrive ainsi dans divers réservoirs : le réservoir Saint-Victor (7 000 mèt. cubes), le réservoir Racine (5 800 mèt. cubes), le réservoir Vaugirard (8 900 mèt. cubes).

Paris peut recevoir du canal de l'Ourcq un cube de 134 000 mètres cubes d'eau par jour, pour tous les points dont la cote de hauteur est inférieure à la cote 52 mètres et sans aucune force mécanique.

Pour divers quartiers de Paris, la cote de hauteur, y compris la hauteur des maisons, est de 80 mètres. Ces points ne peuvent donc pas être desservis par l'eau de l'Ourcq. D'ailleurs, cette eau n'est point potable et ne peut servir que pour les services publics.

250. Eau de Marne. Les eaux de la Marne de Trilbardou et d'Isle-les-Meldeuses sont déversées dans le canal de l'Ourcq et participent ainsi à l'alimentation du bassin de la Villette et de l'aqueduc de Ceinture. Ces deux établissements de Trilbardou et de l'Isle-les-Meldeuses ont coûté environ un million.

A la prise d'eau de la Marne, située à Saint-Maur, l'eau arrive jusque dans la cour de l'usine par un canal d'amenée parallèle et contigu à celui qui sert à la navigation. Ce canal, de 9 mètres d'ouverture, a été presque entièrement percé en souterrain.

Les machines motrices de Saint-Maur consistent en six turbines, dont quatre de L.-D. Girard, de chacune 120 chevaux, et deux du système Fourneyron, de chacune 100 chevaux. Des pompes refoulent l'eau directement dans le réservoir inférieur de Ménilmontant, par des conduites

d'un parcours de 8 500 mètres. L'altitude du réservoir ne permettant pas à ses eaux d'atteindre les hauts quartiers de la ville, on a établi, sur le point culminant de Belleville le réservoir dit du *télégraphe*, divisé, comme celui de Ménilmontant, en deux étages. Dans l'étage inférieur on emmagasine une certaine quantité des eaux de la Marne, et dans celui du haut une partie des eaux de la Dhuis parvient à l'altitude de 134^{m},40, c'est-à-dire à 26^{m},55 plus haut qu'au premier réservoir; ce qui permet de desservir les points les plus élevés : Ménilmontant, Belleville et Montmartre. Cette ascension des eaux, d'un réservoir dans l'autre, est opérée par une machine à vapeur de 15 chevaux, placée au pied du réservoir de Ménilmontant.

Un robinet de partage, placé près du réservoir, permet à la conduite de Saint-Maur de donner, si les besoins du service l'exigent, un fort volume d'eau au réservoir de Charonne, placé près de là.

Les machines de Saint-Maur, dont l'établissement, y compris la valeur foncière et les bâtiments de l'usine, a coûté 7 millions, fournissent aussi 15 000 mètres cubes d'eau au bois de Vincennes, qui les reçoit d'abord dans le lac supérieur de Gravelle.

En résumé, les 3 usines établies sur la Marne ont une puissance de 1 500 chevaux, depuis les travaux exécutés en 1880.

251. Les eaux de Seine puisées à Maisons-Alfort, et la moitié environ de celles refoulées par les machines du quai d'Austerlitz, sont dirigées sur le réservoir de Charonne, pour être ensuite réparties dans les quartiers hauts de la rive droite, les XIXe et XXe arrondissements, et la partie haute des XIe et XIIe. Les deux machines de Maisons-Alfort peuvent, marchant ensemble, donner un maximum de 5 000 mètres; une seule ne donne que 3 000 mètres.

La machine de quarante chevaux de Port-à-l'Anglais et une de celles du quai d'Austerlitz élèvent dans le réservoir de Gentilly l'eau de Seine destinée au XIVe arrondissement et aux parties hautes des XIIIe et XVe. La machine de Port-à-l'Anglais peut donner jusqu'à 9 000 mètres.

L'eau de Seine montée par les machines de Chaillot s'emmagasine dans le réservoir de Passy; puis elle se répartit sur certains points hauts de Paris.

Elle alimente en outre les grands établissements publics, enfin une partie du bois de Boulogne, dont l'alimentation des 847 hectares est complétée par le puits artésien de Passy.

Ce puits de Passy, foré par M. Kind (de 1855 à 1861), a 586^{m},50 de profondeur au-dessous du sol, et 533^{m},35 au-dessous du niveau de la mer. Il a coûté 1 300 000 fr. Par suite d'un accident qui a paralysé la force ascendante qu'on était fondé à espérer, l'eau ne jaillit que d'environ 1 mètre au-dessus du sol.

L'eau de Seine fournie par les machines d'Auteuil et de Neuilly est élevée dans le réservoir de Passy; elle est exclusivement destinée à Auteuil et à Passy. L'eau de Seine aspirée par les machines de Saint-Ouen monte aux réservoirs de Montmartre; elle alimente Montmartre, la Chapelle et une partie des Batignolles.

L'insuffisance du volume d'eau fourni à l'agglomération parisienne, a nécessité, en 1879, les projets de l'ingénieur Humblot, mis bientôt à exécution et consistant à établir trois nouvelles usines à vapeur sur la Seine :

L'usine d'Ivry comprend 6 machines à vapeur de la force de 160 chevaux, et capables de distribuer à Paris 86 000 mètres cubes d'eau par jour.

L'usine de Bercy (quai de la Râpée) fournit 50 000 mètres cubes au pied de la butte Montmartre.

Enfin l'usine de Javel fournit encore 25 000 mètres cubes d'eau, qui renforcent la canalisation de l'Ourcq.

Au total, l'ensemble des pompes établies sur la Seine peut livrer par jour 240 000 mètres cubes d'eau.

La force totale développée par les sept usines établies sur Seine est de 2400 chevaux.

252. **L'eau d'Arcueil** provient des sources dites du Sud, captées dans la commune de Rungis, près Sceaux. Dans la traversée du vallon d'Arcueil, la galerie se transforme en un viaduc, de 25 arcades, qui côtoie les ruines d'un aqueduc dont la construction est due aux Romains.

Autrefois, l'eau d'Arcueil venait faire escale au bassin de l'Observatoire, pour se diriger ensuite sur celui de l'Estrapade; mais, depuis la suppression du premier de ces bassins, elle s'embranche directement sur une conduite d'eau de Seine qui alimente le plateau du Panthéon. Bien qu'évalué à 1 000 mètres cubes, le produit de cette eau est fort variable et atteint rarement ce cube maximum (page 228).

253. Le puits artésien de Grenelle forme un jet d'eau de 33^{m},70 d'élévation au-dessus du niveau du sol. Le forage, qui atteint 510 mètres au-dessous du niveau de la mer, et 547 mètres de profondeur totale, a duré 7 années (1834-1842); il est dû à M. Mulot, ingénieur-mécanicien. L'élégante colonne en fonte qui soutient la conduite verticale ascensionnelle a 42 mètres de hauteur.

Ce puits a coûté 363 000 fr. Son débit était primitivement de 900 mètres par 24 heures; mais il est descendu à 600 et même 250 mètres depuis le forage du puits de Passy. Ses eaux sont déversées dans la canalisation de l'Ourcq. Leur température est de 30°.

En outre de ces deux puits, la Ville en fait établir deux autres, également *intra muros;* leur prix est évalué, pour les deux, à 2 millions de francs. Le premier, situé au lieu dit la Butte-aux-Cailles, atteindra probablement 850 mètres de profondeur; son tubage est de 1^{m},20 de diamètre. Il puisera, comme sa profondeur l'indique, dans une nappe d'eau bien inférieure à celle des puits de Grenelle et de Passy (251).

Le deuxième puits, construit de 1866 à 1888, place Hébert, à la Chapelle, va chercher la même nappe.

Il est profond de 719 mètres et sa température est de 34°,50. Le creusement de ce puits a été fait au moyen d'une tête de sonde, d'un trépan en acier, broyant la roche par un mouvement alternatif; les débris de roche, réduits ainsi presque en poussière, ont été enlevés par

des pompes. Le poids total du tubage est de 400 000 kilogrammes; le diamètre de la colonne centrale est de $1^m,06$. L'eau du puits de la place Hébert sert à l'alimentation des lavoirs. Son débit est de 12 000 mètres cubes environ.

254. Dérivation de la Dhuis. Les sources de la Dhuis se trouvent sur le territoire de la commune de Pargny, canton de Condé (Aisne). Leurs eaux marquent 24 degrés à l'hydromètre, c'est-à-dire qu'elles ne contiennent par litre que 24 centigrammes de carbonate de chaux, sans trace de sulfate; elles sont donc d'excellente qualité (236).

L'eau sort des argiles à meulières, à une température de 10 degrés.

Les travaux d'adduction de la Dhuis ont été faits par l'ingénieur Belgrand (1864-1866). Ils ont coûté 18 millions.

La Dhuis, petit cours d'eau qui se jette dans le Surmelin, affluent de la Marne, est entièrement dirigée sur Paris par une galerie qui traverse les départements de la Marne, de l'Aisne, de Seine-et-Marne, de Seine-et-Oise et de la Seine.

Ce développement de l'aqueduc ramifié se décompose comme suit :

Conduite libre	établie en tranchée	$108253^m,83$	$118006^m,75$
	établie en souterrain	9752 ,92	
Conduite forcée (en siphon).			16037 ,70
Longueur totale de la dérivation, non compris 35000 mètres pour l'aqueduc affluent du Surmelin			$134064^m,45$

Le volume d'eau amené par cet aqueduc est de 20 000 mètres cubes par jour.

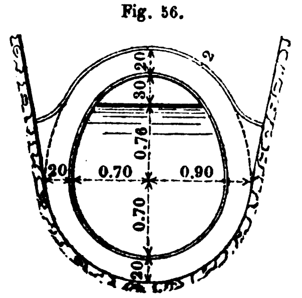
La pente par kilomètre est de $0^m,55$ pour la conduite forcée, qui a $1^m,10$ de diamètre intérieur, et de $0^m,10$ seulement pour la conduite libre. La pente totale de la dérivation est par suite de $20^m,63$.

Les galeries secondaires en conduite libre sont de dimension et de formes variables, nécessitées par la nature des terrains qu'elles traversent et par les positions qu'elles occupent.

La galerie principale offre deux sections, l'une et l'autre ovoïdes, différant seulement d'ampleur à cause de la quantité d'eau que chacune d'elles débite.

Le grand type, conforme au croquis (*fig.* 56), est en maçonnerie de meulière brute et ciment romain, de $0^m,20$ d'épaisseur, y compris un enduit intérieur en ciment de $0^m,02$, avec rocaillage. Aux flancs de la voûte, la maçonnerie est un peu renforcée, et la chape en ciment de $0^m,02$ d'épaisseur s'étend sur les renflements. Le niveau de l'eau est à $0^m,30$ au-dessous de la clef.

Fig. 56.



Le type de petite section n'a dans œuvre que $1^m,20$ de diamètre au lieu de $1^m,40$, et $1^m,54$ de hauteur intérieure au lieu de $1^m,76$.

Sur une longueur d'environ 2 kilomètres en partant de la source, la galerie ovoïde est remplacée par deux conduites de même nature que les précédentes, mais circulaires et de 1 mètre de diamètre. Elles sont accolées avec communication latérale de distance en distance.

A son arrivée au réservoir de Ménilmontant, la conduite affecte, sur une courte étendue, un type spécial à banquettes, ayant 4 mètres de largeur aux naissances, et éclairé par des verres épais circulaires encastrés dans la voûte.

Des regards espacés de 500 mètres sont établis sur toute la longueur de la conduite; ils sont construits en maçonnerie de meulière et mortier de ciment.

Il y a des regards aux extrémités d'amont et d'aval des siphons, à tous les points où la disposition de la cuvette varie, enfin aux points bas des siphons où sont placés des robinets-vannes.

Le radier de la cuvette des regards est à $0^m,30$ en contre-bas du radier de l'aqueduc.

Conduite forcée. Les siphons sont formés d'une seule conduite en tuyaux de fonte dont le diamètre est $D = 0^m,80$ au delà du siphon du Surmelin et $D = 1$ mètre en deçà. L'épaisseur E des tuyaux varie avec la charge :

Charge de 40 mètres et au-dessous . . .	pour $D = 0^m,80$, $E = 0^m,018$;
	pour $D = 1\ ,00$, $E = 0\ ,021$;
Charge au-dessus de 40 mètres.	pour $D = 1\ ,80$, $E = 0\ ,020$;
	pour $D = 1\ ,00$, $E = 0\ ,025$.

Tous les joints sont à emboîtement et cordon. La longueur de l'anneau en plomb fondu est de $0^m,05$ pour les tuyaux exposés à une charge de 40 mètres et au-dessus, et de $0^m,04$ pour ceux exposés à une charge moindre. Cet anneau est maté au refus.

On devait aussi employer des tuyaux à bague; mais on y a renoncé. Le poids de la bague était fixé à 50 kilog. pour les tuyaux de $0^m,80$ de diamètre, et à 62 kilog. pour ceux de $1^m,10$. Pour faire les joints, on ajuste les tuyaux bout à bout après avoir glissé le manchon sur l'un d'eux; on laisse entre les bouts, pour la dilatation, un intervalle de $0^m,002$, qu'on glaise pour empêcher le plomb d'y pénétrer; enfin, on ajuste le manchon sans le corder, on remplit le joint de plomb fondu et on le mate au refus.

Ventelles. Robinets. Ventouses. Aux extrémités de chaque conduite forcée, est établie une cloison en tôle qui sépare cette conduite de la conduite libre; dans cette cloison en tôle est placée une ventelle, qui, ouverte, donne passage à l'eau, et fermée, isole la conduite libre du siphon.

Un robinet de décharge de $0^m,25$, monté sur la tubulure au point bas de chaque conduite, sert, au besoin, à la vider. L'écoulement de l'air, lorsque la conduite passe sur un pont, est favorisée, soit par une ventouse, soit par un petit robinet monté sur un mamelon taraudé, que porte un tuyau de la conduite.

Déversoirs. Soupape de décharge. Un déversoir accompagné d'une

soupape de décharge est également placé en amont des parties de conduite en siphon ou en souterrain. On a fait coïncider l'emplacement de cet ouvrage avec celui d'un regard; on a choisi à cet effet le regard le plus voisin d'un ruisseau ou d'un ravin dans lequel on peut jeter les eaux de la décharge.

Tranchées. Le tracé des conduites est fait de telle sorte qu'en général la hauteur de déblai au-dessus des maçonneries de l'aqueduc ou de la fonte du tuyau soit de 1 mètre.

Le fond de la tranchée est ouvert suivant la forme extérieure des maçonneries jusqu'au niveau du centre de l'aqueduc; au-dessus, les talus sont réglés avec fruit de 1/20.

On est entré en souterrain lorsque la profondeur de la tranchée atteint environ 7 mètres. Les fouilles en souterrain sont faites suivant le profil rigoureux de l'extérieur des maçonneries. Les puits étaient en général espacés de 200 mètres.

Les tranchées des conduites forcées ont des dimensions telles qu'il est facile d'y descendre et poser les tuyaux. Pour faciliter le matage des joints, des niches sont pratiquées au fond et de chaque côté de ces tranchées aux extrémités des tuyaux.

Conduite libre sur les ponts. Elle est formée de deux murs de têtes ayant $0^m,90$ d'épaisseur au niveau supérieur de l'extrados des ponts et $0^m,70$ d'épaisseur en couronne non compris le cordon de $0^m,15$ de saillie, avec chanfrein.

Le parement extérieur de ces murs est vertical, le parement intérieur est circulaire raccordé verticalement au sommet.

Au delà du Surmelin, la hauteur des murs, y compris le cordon, est de $1^m,25$ au-dessus du niveau supérieur de l'extrados des voûtes; en deçà, cette hauteur est portée à $1^m,40$.

La largeur entre les parements verticaux est de $2^m,80$ au delà du Surmelin et de $2^m,90$ en deçà.

Les parements intérieurs de la conduite sont revêtus d'un enduit de ciment de $0^m,02$ d'épaisseur.

Une voûte couvre la conduite; elle est formée de deux briquettes superposées; elle a une flèche de $0^m,27$ et une épaisseur de $0^m,085$, y compris une chape de $0^m,02$ d'épaisseur et un joint circulaire de $0^m,011$.

Les murs de têtes servent de culées aux voûtes de couverture.

Conduite forcée sur un pont. Les ponts destinés à faire franchir un cours d'eau à la conduite forcée ont $2^m,70$ de largeur entre les têtes, depuis les sources de la Dhuis jusqu'au siphon du Surmelin compris; entre ce siphon et Paris, cette largeur est portée à 4 mètres. Les murs de têtes s'élèvent au-dessus de l'extrados avec une épaisseur de $0^m,60$, jusqu'à une hauteur de $2^m,70$ sous le cordon, rachetant une épaisseur de $0^m,30$, pour une saillie de $0^m,20$ avec chanfrein. Entre les murs, la largeur est de $1^m,50$ dans le premier cas et de $2^m,80$ dans le second. Les murs supportent transversalement, de 2 mètres en 2 mètres, des fers à double T qui servent eux-mêmes à soutenir de petites voûtes en briquettes, de 2 mètres d'ouverture, et de $0^m,20$ de flèche, destinées à

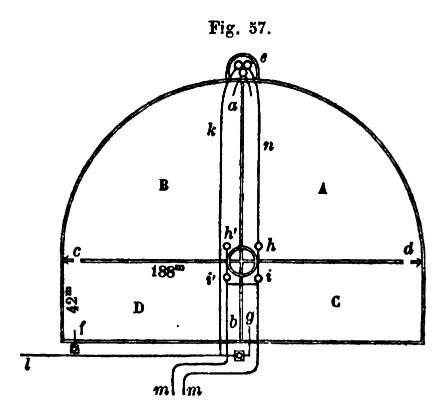
recouvrir la chambre du tuyau. Ces voûtes, formées de deux rangs de briquettes à plat avec du mortier de ciment, ont $0^m,085$ d'épaisseur, y compris une chape de $0^m,02$ d'épaisseur et un joint circulaire de $0^m,011$; elles se raccordent avec le dessus des cordons en pierre de taille qui couronnent les murs de têtes du pont par un rocaillage placé sous la chape.

Le tuyau est maintenu à une hauteur de $0^m,50$ à $0^m,60$ au-dessus de l'extrados et des maçonneries des reins des voûtes au moyen de supports en maçonnerie ou en fonte.

La dépense totale de la dérivation, pour la construction seule de la conduite, était prévue au projet pour une somme de 11 597 207f,56. Cette somme ne comprend ni les acquisitions de terrain, ni les dépenses de diverse nature afférentes aux travaux autres que ceux de la conduite proprement dite, entre autres ceux du réservoir de Ménilmontant et de la distribution des eaux dans la ville.

255. Réservoir de Ménilmontant, destiné à recevoir et distribuer les eaux de la Dhuis. Les eaux de la Dhuis arrivent sur les hauteurs de Ménilmontant à la cote $107^m,85$ au-dessus du niveau de la mer, et à $82^m,61$ au-dessus de l'étiage de la Seine au pont de la Tournelle. L'ensemble du réservoir qui reçoit ces eaux se compose en plan d'un demi-cercle de 188 mètres de diamètre intérieur, et d'une partie rectangulaire qui a pour longueur le diamètre 188 mètres et pour largeur 42 mètres dans œuvre. Sa contenance est de 100 000 mètres cubes. Le demi-cercle présente sa convexité au coteau, contre lequel il s'appuie à peu de distance de l'enceinte fortifiée. Comme le réservoir est en déblai contre des marnes vertes qui surmontent le terrain gypseux, sa forme présente plus de résistance à la poussée des terres, et elle contient la plus grande surface sous la plus petite enveloppe.

Fig. 57.



Sur une partie de ce réservoir on a enlevé les marnes vertes jusqu'au terrain solide, et dans l'excavation on a créé un réservoir inférieur d'environ 36000 mètres cubes de capacité, recevant les eaux de la Marne élevées par les machines de la dérivation de Saint-Maur (250). Ces eaux sont refoulées de la cote 28 mètres à la cote 108 mètres (du réservoir), au moyen de la roue-turbine Girard, établie à l'usine de Saint-Maur.

Où le réservoir inférieur n'existe pas, on s'est borné à prolonger les piliers de support du réservoir supérieur jusqu'au terrain solide, sans toucher aux marnes vertes qui les enveloppent.

Le réservoir supérieur est divisé en deux compartiments par un mur de séparation *ab* perpendiculaire au diamètre du demi-cercle et passant par son centre. Ce mur de séparation est percé, dans la partie rectangulaire du réservoir, à une hauteur de 0m,50 au-dessus du radier, d'une ouverture qui peut être fermée à volonté par un robinet-vanne.

Un deuxième mur *cd* sépare la partie demi-circulaire de la partie rectangulaire, et présente de même, vers chacune de ses extrémités, une ouverture dont le seuil est au niveau du radier.

L'eau de la dérivation, arrivant dans une bâche *e* au sommet de la demi-circonférence de pourtour du réservoir, peut être jetée soit d'un côté, soit de l'autre du mur *ab*, c'est-à-dire soit dans l'un, soit dans l'autre des deux compartiments.

Généralement l'eau déversée dans le compartiment de droite A parcourt tout ce compartiment en passant par l'ouverture réservée à l'extrémité *d* du deuxième mur de séparation, arrive dans la partie rectangulaire D du compartiment de gauche par le robinet-vanne destiné à mettre en communication les deux compartiments, et est distribuée par une bonde *f* placée à l'angle opposé de cette partie rectangulaire.

En cas de mise en chômage du compartiment de droite A, l'eau de la dérivation est jetée dans le compartiment de gauche B, et s'écoule par la même bonde après avoir traversé tout ce compartiment.

Dans le cas contraire où le compartiment de gauche ne peut être mis en service, on ferme la communication des deux compartiments, et la distribution a lieu par la bonde *g* du compartiment de droite placée vers la base du réservoir dans l'angle du mur de séparation *ab*.

Les deux bondes de distribution *f* et *g* sont placées à 0m,50 au-dessus du radier, de telle sorte que la tranche d'eau inférieure, sur 0m,50 d'épaisseur, ne peut s'écouler de l'un quelconque des compartiments que par des bondes de décharge de fond *h*, *i*, *h'* et *i'*, placées près du centre du demi-cercle. Ces bondes permettent d'envoyer l'eau dans le réservoir inférieur, et la pente du radier est disposée de manière qu'elles puissent réaliser la vidange complète du réservoir supérieur.

Le centre du demi-cercle est d'ailleurs occupé par une tour renfermant quatre escaliers correspondant à chacune des deux parties des deux compartiments.

Enfin la bâche d'arrivée de l'eau comporte une bonde de distribution directe mise en communication avec la conduite de départ *l* par un branchement *k* passant sous le radier du réservoir, et un orifice de trop-plein communiquant de la même manière par un branchement *n* avec les conduites de décharge *m*, *m*.

Quant au réservoir de la Marne, on peut écouler ses eaux dans la galerie d'égout qui contient les conduites de distribution.

Le trop-plein des deux réservoirs est limité à 5 mètres de hauteur au-dessus du fond, au moyen d'un tube vertical qui déverse les eaux dans l'égout de décharge.

Les piliers de fondation, d'une hauteur totale variant de $2^m,25$ à $6^m,10$ au-dessous du radier, sont espacés de 6 mètres d'axe en axe; ils pénètrent d'environ 1 mètre de profondeur dans un terrain gypseux qui était recouvert d'une épaisseur de 7 à 8 mètres de marnes vertes. Ces piliers supportent, sur le sol de fondation, une charge de $5^k,00$ à $5^k,50$ par centimètre carré, quand le réservoir supérieur est rempli d'eau à la hauteur de 5 mètres.

La fondation de ces piliers est en moellons et mortier de chaux hydraulique, et la partie en élévation est en meulière et ciment, recouverte d'un enduit. De leur sommet, qui a $1^m,40$ de côté, partent des voûtes d'arête en plein cintre de $4^m,60$ d'ouverture et $0^m,40$ d'épaisseur à la clef. Ces voûtes sont extradossées horizontalement et forment ainsi le radier du réservoir supérieur.

Des chaînes en fer carré de $0^m,04$ de côté, placées à $0^m,70$ environ en contre-bas du couronnement des murs de pourtour, passent dans ces murs de pourtour et dans ceux de séparation et de refend, afin d'en mieux relier et consolider l'ensemble. Ces chaînes sont assemblées au moyen de forts tirants encastrés de $0^m,70$ dans la maçonnerie.

Les murs de pourtour, qui n'excèdent guère le sol des voies environnantes, sont en outre soutenus par des talus en terre gazonnée, qui les masquent complètement. Ces murs de pourtour ont $1^m,40$ d'épaisseur en couronne; leur parement extérieur tombe verticalement dans les terres où ils servent de murs de soutènement. Le parement intérieur présente un fruit de 1/5, et un solin de 2 mètres de rayon le raccorde avec le radier; de plus encore on a donné de ce côté, à la fondation, un empatement de $0^m,20$ en avant du parement incliné au 1/5.

Le mur de séparation *ab* a $1^m,30$ d'épaisseur au sommet, et présente un fruit de 1/10 sur chaque face, qui se raccorde encore avec le radier par un solin de 2 mètres de rayon.

Ces gros murs sont en maçonnerie de moellons durs à l'intérieur et de meulière en parement sur $0^m,30$ d'épaisseur, avec mortier de chaux hydraulique composé de trois parties de sable pour une partie de chaux. Leurs parements intérieurs sont revêtus d'un enduit en mortier de ciment de $0^m,02$ d'épaisseur au sommet et de $0^m,03$ vers le radier.

Le mur de séparation *cd* a 1 mètre d'épaisseur au sommet, un fruit de 1/20 sur chaque face, qu'un solin de $0^m,30$ de rayon raccorde avec le radier. Il est construit en meulière et mortier de chaux hydraulique, avec enduit en ciment de $0^m,01$ d'épaisseur, sur rocaillage.

En outre, des murs de refend, percés d'arcs, s'étendent au travers des différentes parties du réservoir, dans le but de rattacher les murs de pourtour et de séparation, et de consolider l'ensemble de la couverture. Ces murs, en maçonnerie de meulière et mortier composé d'une partie de ciment de Vassy pour trois parties de sable, sont couverts d'un enduit de $0^m,01$ fait sans rocaillage.

Le radier du réservoir supérieur, de $0^m,40$ d'épaisseur à la clef des voûtes de fondation, est en maçonnerie de meulière et mortier composé de cinq parties de sable et deux de chaux. Il est revêtu d'un en-

duit de $0^m,03$ d'épaisseur, et présente une pente de $0^m,001$ par mètre convergeant au centre de la demi-circonférence. Les meulières sont placées en hérisson.

Le radier du réservoir inférieur est établi à peu près dans les mêmes conditions que le précédent, sauf qu'il repose directement sur le sol solide, au lieu d'être formé d'un ensemble de voûtes.

La couverture du réservoir supérieur est formée de voûtes d'arête composées de deux rangs de briquettes de Montereau, de $0^m,028$ d'épaisseur, posées à plat, à joints croisés, avec mortier composé de parties égales de ciment de Vassy et de sable de rivière tamisé. L'épaisseur de ces voûtes est de $0^m,08$, y compris la chape de $0^m,02$, en même mortier que pour les voûtes elles-mêmes. Les vides des retombées sur les piliers sont remplis, jusqu'au niveau de l'extrados des voûtes, de béton maigre composé de dix parties de gros sable pour une partie de chaux. Le tout est surmonté d'une couche de gravier de $0^m,10$ sur laquelle repose une épaisseur de $0^m,40$ de terre gazonnée, retenue au pourtour par un petit mur en briques. Cette couche de terre maintient l'eau à une température constante, ni tiède ni froide.

L'ouverture des voûtes est de $5^m,40$, avec flèche de $0^m,60$. Elles reposent sur des piliers en meulière et mortier de ciment, avec enduit de $0^m,01$ d'épaisseur. Ces piliers, distants de 6 mètres d'axe en axe, correspondent aux pieds-droits des voûtes de fondation. Au nombre de plus de six cents, dont quatre cent quatre-vingt-huit isolés de tout mur, ces piliers sont montés sur le radier supérieur, préalablement garni de son enduit. Ils présentent à la base un léger solin de $0^m,30$ de rayon; ils ont $0^m,60$ de côté au sommet et $0^m,75$ à la naissance du solin; leur hauteur varie de $5^m,00$ à $5^m,10$, afin de ménager à la surface de la chape de la couverture la pente nécessaire pour l'écoulement des eaux pluviales, qu'un tuyau conduit dans le réservoir inférieur.

Dans les ouvrages destinés à contenir de l'eau, réservoirs ou citernes, il est très important d'avoir des surfaces lisses non susceptibles d'altération. Si les parois s'épaufrent, l'eau, si peu chargée de matières étrangères qu'elle puisse être, dépose dans les cavités, et le nettoyage devient difficile quand le réservoir est mis en vidange : c'est pourquoi on a revêtu d'un enduit en ciment de Vassy toutes les parois du réservoir de Ménilmontant en contact avec l'eau.

Par sa très grande capacité, le réservoir de Ménilmontant assure la régularité du service de distribution. L'eau y dépose les matières qu'elle peut contenir en suspension, et, se trouvant à l'abri de l'action solaire, elle s'y repose sans développer aucun germe végétal pouvant altérer sa pureté.

Le montant de la dépense de la construction proprement dite du réservoir de Ménilmontant, non compris la fontainerie, a été réglé à la somme de 3 497 $049^f,40$.

256. Conditions qu'on a dû chercher à réaliser dans le choix des sources destinées à l'alimentation de la ville de Paris [*Annales des ponts et chaussées*, année 1873 (note Belgrand)]. Les eaux trop chargées

de bicarbonate de chaux formant des incrustations calcaires dans les conduites, on conçoit combien l'eau de l'Ourcq, qui est incrustante et qui circule dans la moitié au moins de la canalisation parisienne, présente de dangers.

Une rivière, alimentée par des sources incrustantes, ramène elle-même au point de stabilité la dissolution de bicarbonate de chaux que renferment ses eaux. C'est ce que prouvent des essais faits sur la Seine et sur l'Yonne. Des cours d'eau abaissent naturellement leur titre hydrotimétrique à 18°,60 et conservent ce titre stable sur des parcours de 30 à 40 kilomètres.

Les crues des rivières de la Bourgogne durent, presque tous les ans, des mois entiers, pendant lesquels le degré hydrotimétrique de l'eau de la Seine, correspondant au bicarbonate de chaux, atteint la limite de 18°,60. Si donc ce titre était trop élevé, l'eau de Seine serait incrustante tous les ans, pendant des mois entiers, et les conduites, posées depuis longtemps, seraient tapissées de dépôts calcaires; or c'est ce qui n'a pas lieu. Donc, on peut distribuer, sans crainte, une eau dont le titre hydrotimétrique ne dépasse pas 18°,60.

Les eaux d'une distribution dont le titre hydrotimétrique atteint ou dépasse 20° sont incrustantes. Ainsi le titre de l'eau de la source du Rosoir, distribuée à Dijon (170), est 22°. L'eau est incrustante, et, d'après des observations de Bazin, en vingt ans les dépôts dans les conduites atteignent une épaisseur de 2 à 3 millimètres. Les dépôts sont beaucoup plus épais aux points où le régime se modifie d'une manière quelconque, par exemple à la rencontre des robinets d'arrêt. Au jet d'eau du parc, l'épaisseur des incrustations, dans la conduite de fuite, s'augmente de 0m,01 par an.

Dans les analyses, les dosages sont exprimés en carbonate de chaux ou simplement en chaux. Le titre-limite 18°,60 correspond à 0g,1916 de carbonate de chaux ou au poids de bicarbonate de chaux correspondant à 0g,1060 de chaux par litre d'eau. Telles sont les limites dans lesquelles on doit se renfermer. Il est évident que le sulfate de chaux, le chlorure de calcium et autres sels de chaux solubles n'augmentent pas le pouvoir incrustant de l'eau (234).

Le problème qui consiste à déterminer la *pente minimum à donner à un aqueduc* n'était pas moins important que celui qui consiste à trouver le degré hydrotimétrique de l'eau. En effet, les sources parmi lesquelles on pouvait faire un choix étant toutes situées au fond des vallées les plus profondes qui sillonnent les plaines très peu élevées constituant la plus grande partie du bassin de la Seine, on n'avait pas de pente à perdre.

La pente minimum d'un aqueduc est celle qui donne à l'eau une vitesse suffisante pour qu'il ne se forme aucun dépôt vaseux dans la cunette. D'après Dubuat, les matières vaseuses ne se déposent pas dans une eau animée d'une vitesse moyenne de 0m,15. Comme il faut se tenir un peu au-dessus de cette limite, Belgrand suppose, dans l'aqueduc, une vitesse moyenne de 0m,25 au moins; ce qui, pour les types

admis pour la Dhuis, correspond à une pente d'environ $0^m,10$ par kilomètre.

Les vallées se franchissent avec des conduites forcées métalliques, auxquelles on donne improprement le nom de *siphons*. Pour la Dhuis, ces conduites se composent d'un tuyau de 1 mètre de diamètre ayant $0^m,60$ de charge par kilomètre.

Ainsi, pour les types admis dans la dérivation de la Dhuis, l'altitude des sources doit être au moins égale à l'altitude du trop-plein du réservoir, augmentée de $0^m,10$ par kilomètre d'aqueduc et de $0^m,60$ par kilomètre de conduite forcée.

257. Dérivation de la Vanne. *Réservoir de Montsouris.* La Vanne est une petite rivière qui prend sa source, dans le département de l'Aube, à Fontvanne, près d'Estissac. Ses eaux marquent 17 à 18° hydrotimétriques, et leur température est d'environ 11°. Les eaux sont amenées à Paris par une galerie qui traverse les départements de l'Aube, de l'Yonne, de Seine-et-Marne, de Seine-et-Oise et de la Seine.

L'aqueduc a le développement suivant :

Conduite libre établie	en tranchée.	$58510^m,40$	$119869^m,00$
	sur arcades	$25830^m,56$	
	en souterrain.	$35528^m,04$	
Conduite forcée (siphon de $1^m,10$ de diamètre)			$17761^m,50$
Longueur totale de la dérivation			$137630^m,50$

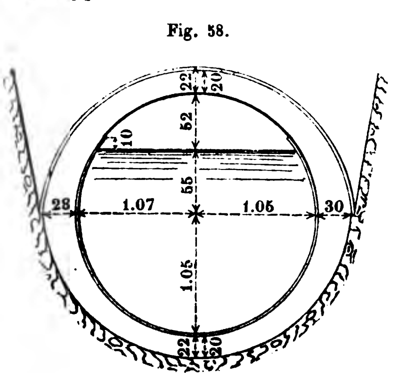
non compris environ 37 kilomètres de ramifications secondaires.

Ce travail considérable a été fait par Belgrand, de 1868 à 1874; il a coûté 50 millions.

Le parcours présente une pente totale de $25^m,70$.

Les types des conduites libres auxiliaires varient comme ceux de la Dhuis, et pour les mêmes causes (254). Mais la conduite maîtresse, posée en tranchée, est composée, comme l'indique la *fig.* 58, d'une enveloppe annulaire en maçonnerie de pierrailles hourdées en mortier de ciment. Cette enveloppe, circulaire à l'intérieur, a $0^m,28$ d'épaisseur au niveau du centre, et seulement $0^m,20$ à la clef et au radier, non compris une chape en ciment de $0^m,02$ qui recouvre le dessus de la conduite, ni un enduit intérieur de $0^m,02$ s'élevant à $0^m,10$ au-dessus du niveau de l'eau.

Fig. 58.



Dans les terrains peu consistants, cette conduite s'appuie sur des pieds-droits légèrement ébasés et arasés horizontalement à leur base.

A son arrivée à Montrouge, au mur même des fortifications, la con-

duite est remplacée par deux siphons en fonte, de $1^m,10$ de diamètre, placés dans des galeries en maçonnerie.

Avant d'entrer à Paris, elle franchit la vallée de la Bièvre sur un grand pont-aqueduc, élevé lui-même sur l'aqueduc d'Arcueil, qui lui sert ainsi de substruction.

D'après le détail estimatif du projet, la construction seule de la conduite de dérivation coûte 26 457 648^f,94. Cette somme ne comprend ni les acquisitions de terrain, ni les dépenses de toute nature concernant les travaux autres que ceux de la conduite (notamment ceux du réservoir de Montsouris et de la distribution des eaux dans la Ville).

Les eaux de la dérivation sont reçues à Paris, sur le plateau de Montrouge, à côté du parc de Montsouris, dans un vaste réservoir situé à l'intérieur et près des fortifications. Ce réservoir occupe hors œuvre, sur le sol, un rectangle de $136^m,60$ sur 264 mètres. Ses murs sont construits en meulière et ont 13 mètres de hauteur. Ses fondations reposent sur la masse de calcaire grossier qui a été exploité en galeries souterraines (anciennes carrières de Paris, plus connues sous le nom de Catacombes). La consolidation du ciel de ces galeries exigeait des travaux qu'a exécutés le service spécial des mines.

Le sol sur lequel repose le réservoir est excellent; la couche de terre a une épaisseur moyenne de 30 mètres pour aller jusqu'au ciel des galeries souterraines; néanmoins, on a jugé prudent de faire un certain nombre de puits régulièrement espacés, descendant à une profondeur variable allant jusqu'à 20 mètres, sur des sections variant de 2 à 4 mètres de longueur sur 4 mètres de largeur. Ces puits furent ensuite remplis de béton. L'administration des mines fit, de son côté, exécuter dans les Catacombes mêmes de fortes piles en moellons bien appareillés et mortier de ciment, pour consolider les supports naturels réservés autrefois dans la masse rocheuse lors de l'exploitation des carrières. Ces travaux de soutènement et ceux des puits dépassent, à eux seuls, 1 million de francs.

Le réservoir est divisé en deux étages, et contient 305 000 mètres cubes d'eau, dont 165 000 pour l'étage inférieur avec une profondeur d'eau de $5^m,50$, et 140 000 pour celui supérieur avec une hauteur moyenne d'eau de $3^m,55$, dont le niveau supérieur est à l'altitude minima de 80 mètres, altitude à laquelle aboutit à Paris l'aqueduc de dérivation.

Dans toute la longueur des murs de pourtour du bassin inférieur, on a ménagé une petite galerie de 2 mètres de hauteur sur $0^m,90$ de largeur en moyenne. Elle est destinée à la circulation du personnel chargé de l'entretien. Elle est séparée du réservoir proprement dit par une murette en meulière, qui porte à sa partie supérieure des ouvertures de $0^m,50$ de hauteur. Ces ouvertures, dont le sommet affleure celui de la galerie, permettent au regard de se promener sur la surface du liquide et sous l'intrados des voûtes.

Chaque étage est divisé en deux compartiments égaux par un mur de séparation parallèle au plus petit côté.

Des escaliers tournants en fonte permettent de descendre dans le ré-

servoir et de le visiter. En outre, un large escalier facilite l'accès de toutes les parties du réservoir.

Des ouvertures circulaires, réservées au sommet d'un certain nombre de voûtes et fermées par un verre épais, éclairent le réservoir supérieur.

Les cheminées supportant les jours de la couverture ou donnant passage aux escaliers sont en maçonnerie de briques et ciment.

Les eaux de la dérivation de la Vanne arrivent aux réservoirs inférieur et supérieur par un double siphon en fonte de $1^m,10$ de diamètre intérieur, placé dans une galerie en maçonnerie de meulière et ciment. Cette galerie rejoint celle de la dérivation, avec laquelle elle se raccorde.

La bâche d'arrivée est placée au centre même du réservoir, au milieu d'une tour de 17 mètres de diamètre, munie d'un escalier tournant. C'est là que débouchent les deux conduites de la dérivation ainsi qu'un canal annulaire servant de déversoir. C'est également de ce point que partent les différentes conduites d'alimentation des compartiments inférieurs et supérieurs du réservoir, ainsi que celles de distribution dans Paris.

5 200 000 francs est la dépense de construction de ce vaste réservoir prévue au détail estimatif.

Le réservoir de Montsouris peut emmagasiner les 305 000 mètres cubes d'eau que fournit en moyenne en trois jours le canal de dérivation de la Vanne.

Dans la vallée de la Vanne sont établies (depuis 1879) quatre usines hydrauliques, à Chigy, à Laforge, à Malay et à Maillot, pouvant développer en tout 450 chevaux de force. L'usine de Maillot élève, dans l'aqueduc de la Vanne, l'eau de la dérivation de Cochepies.

258. Dérivation des eaux de l'Avre et de la Vigne (près de Verneuil) (Eure-et-Loir). En juillet 1890 a été promulguée la loi déclarant d'utilité publique les travaux de la dérivation des sources de l'Avre et de la Vigne, qui doivent apporter par an 60 000 nouveaux mètres cubes d'eau potable à la ville de Paris.

Les travaux ont commencé immédiatement : le jalonnement du tracé a été entrepris ainsi que l'étude de l'établissement du grand tunnel, qui doit permettre à la dérivation de passer sous les hauteurs qui s'étendent de Marly à Saint-Cloud. Ce tunnel, qui aura environ $7^{km},500$ de longueur, commencera aux abords du parc de Versailles et sortira à Villeneuve-l'Étang avec une profondeur au-dessous du sol qui atteindra en certains points 70 mètres. Sur ce parcours, on doit creuser quinze puits, distants de 500 mètres. Un tube d'acier laminé de $1^m,50$ de diamètre doit aller de Saint-Cloud à Auteuil. On espère terminer le travail le 1er avril 1893.

Dès le début des travaux, des difficultés dues à la conformation des terrains se sont présentées. Les collines que l'on doit traverser présentent d'abord des sables secs ; mais, à une certaine profondeur, ces sables sont mêlés d'eau. Le sable sec ne présente pas de grandes difficultés, et on le maintient au moyen de planches et de cadres fortement serrés. Pour traverser les sables humides, on fait ordinairement usage de divers moyens tels que la congélation, les varages, l'air comprimé. Ici, les

ingénieurs ont essayé un nouveau procédé qui consiste à descendre dans le puits un cuvelage métallique de 3m,50 de hauteur, formé de deux cylindres concentriques, réunis par des armatures en fer. Entre les deux cylindres, on coulera du mortier de ciment pour donner à l'ensemble une grande rigidité. A leur partie inférieure, les deux cylindres se rejoignent et se terminent par une trousse coupante en acier qui, sous le poids de la construction, s'enfoncera dans le sable humide.

Ces deux tubes mis en place, on épuisera et on déblaiera à l'intérieur, comme on le fait dans des travaux analogues. Les tubes métalliques, ainsi que le remplissage de béton, seront prolongés au fur et à mesure de la descente de la construction.

Le réservoir qui sera construit à Saint-Cloud doit contenir 300 000 mètres cubes.

ÉGOUTS

259. Egouts. Ces canaux souterrains, destinés à l'évacuation des eaux pluviales et de toutes celles employées aux services public et privé d'une ville, comprennent les *égouts publics* et les *égouts particuliers.*

Égouts publics. Les divers types d'égout public adoptés à Paris peuvent se résumer dans les trois catégories suivantes :

1re Les *collecteurs principaux*, à cunette de 1 mètre de profondeur au moins, dont le curage s'opère au moyen de bateaux-vannes, et dont la section intérieure varie de 11mq,40 à 18mq,70 et la pente du radier de 0m,30 à 0m,50 par kilomètre;

2e Les *collecteurs ordinaires*, à cunette de 0m,80 de profondeur au moins, dont le curage s'opère au moyen de wagons-vannes guidés par des rails fixés sur les bords de la cunette, et dont la section intérieure varie de 4mq,25 à 11mq,40 et la pente du radier de 0m,50 à 5 mètres par kilomètre;

3e Les *égouts sans cunette*, dont la section intérieure varie de 2mq,45 à 3mq,30 et dont la pente du radier, qui est de 1m,50 au moins par kilomètre pour les égouts qui reçoivent peu d'eau, peut être portée jusqu'à 50 mètres, et même jusqu'à 80 mètres par kilomètre pour les galeries de peu de longueur.

Pour la facilité du curage, il convient de tenir la pente du radier aussi près que possible des limites supérieures.

La *maçonnerie d'égout*, comme celle de conduite d'eau, d'aqueduc, de fosse d'aisances, etc., se fait en meulière et mortier de chaux hydraulique, ou mieux en meulière et mortier de ciment. Dans ce dernier cas, les épaisseurs sont réduites aux 2/3 environ de celles adoptées quand on fait usage de mortier de bonne chaux hydraulique.

Les épaisseurs adoptées pour la maçonnerie de meulière et ciment, par les ingénieurs du service municipal de la ville de Paris, sont à très peu près les suivantes :

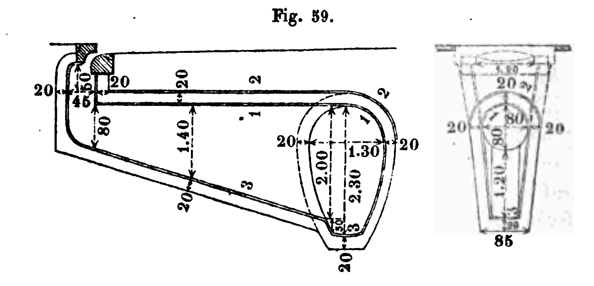
Aqueducs et égouts de moins de 2 mètres de largeur aux naissances, et ayant jusqu'à 2m,50 de hauteur sous clef 0m,20

Aqueducs et égouts de 2 à 3 mètres de largeur aux naissances, et ayant $2^m,50$ à $4^m,00$ de hauteur sous clef . . . . $0^m,30$
Aqueducs et égouts de 3 à 4 mètres de largeur aux naissances, et de $4^m,00$ à $4^m,50$ de hauteur sous clef . . . . $0^m,35$
Aqueducs et égouts de $4^m,50$ à $6^m,00$ de largeur aux naissances, et de $4^m,50$ à $5^m,50$ de hauteur sous clef. . . . . $0^m,40$

Les égouts doivent être établis de manière que le dessus de l'extrados de la voûte se trouve à 1 mètre au moins au-dessous de la face inférieure des pavés ou du macadam formant la chaussée; dans des cas exceptionnels et sur de très petites longueurs, ce minimum peut descendre à $0^m,40$.

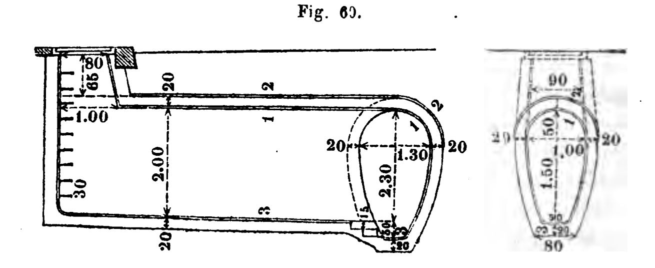
260. Branchements de bouches. Les eaux sont conduites dans les égouts par les ruisseaux et caniveaux qui aboutissent à l'entrée des *bouches d'égout*, qu'on a soin de placer aux points bas des rues. Ces bouches se composent ordinairement d'un couronnement en granit évidé continuant la bordure du trottoir, et d'une *bavette*, également en granit, qu'on pose à la hauteur des caniveaux sur la partie supérieure des murs d'une cheminée verticale de chute. Cette cheminée, dont la section a ordinairement 1 mètre de longueur moyenne sur $0^m,45$ de largeur, aboutit à une galerie qui la met en communication avec l'égout public. Cette

Fig. 59.



galerie, désignée sous le nom de *branchement de bouche*, a $1^m,40$ de hauteur moyenne sous clef, $0^m,80$ de largeur aux naissances de la voûte, qui est en plein cintre, et $0^m,50$ de largeur au radier.

Fig. 60.



Le service intérieur des égouts se fait au moyen de regards établis à 50 mètres de distance l'un de l'autre, et autant que possible sous les

trottoirs, afin de supprimer les trappes sous chaussées, qui sont si gênantes pour la circulation des voitures.

Lorsque l'égout est construit sous le trottoir, les regards se composent simplement d'une cheminée verticale établie sur l'axe de l'égout. Cette cheminée, qui a moyennement $0^m,90$ de côté, est terminée à la surface du sol par une trappe en fonte composée d'un châssis fixe et d'un tampon mobile de $0^m,80$ de diamètre.

Quand, au contraire, l'égout est construit sous la chaussée, la cheminée de regard se trouvant sous trottoir, on établit, pour la communication avec l'égout, une galerie ou *branchement de regard*, dont les dimensions sont ordinairement 2 mètres de hauteur sous clef, 1 mètre de largeur aux naissances et $0^m,50$ de largeur au radier.

Lorsque la profondeur de la fouille le permet, on place ordinairement le châssis à trappe à $0^m,50$ au plus au-dessus de l'extrados de la voûte du branchement de regard, et l'on rachète par plusieurs gradins la différence de niveau existant entre le radier du branchement de regard et celui de l'égout public. Ces gradins, qui ont ordinairement $0^m,15$ à $0^m,20$ de hauteur, sur $0^m,40$ à $0^m,50$ de largeur, sont d'une très grande utilité pour le garage des ouvriers égoutiers dans les moments d'orage.

Lorsque la pente est considérable, quand elle dépasse, par exemple, 10 mètres par kilomètre, les égouts les plus petits, ceux de $2^{mq},45$ à $3^{mq},00$ de section, sont presque toujours suffisants pour débiter l'eau du bassin à desservir; mais la disposition qui prescrit de poser les conduites d'eau dans les égouts oblige, dans la plupart des cas, d'avoir recours à des dimensions plus grandes, qui permettent de recevoir une ou plusieurs conduites d'eau dont les diamètres peuvent varier de $0^m,10$ à $1^m,10$.

261. Disposition des égouts suivant la largeur des rues, à Paris. Dans les rues de 20 mètres ou de plus de 20 mètres de largeur, on doit construire un égout sous chaque trottoir; le parement extérieur des maçonneries, aux naissances de la voûte, doit être à $0^m,60$ de l'alignement des maisons. Dans les rues de moins de 20 mètres de largeur, on ne construit qu'un seul égout dans l'axe de la rue.

262. Choix d'un type d'égout. Lorsque la pente est considérable, et qu'elle dépasse, par exemple, 10 mètres par kilomètre, les égouts de petite section n°s 10 et 12 sont presque toujours suffisants pour débiter l'eau du bassin.

Lorsque les pentes sont faibles, la détermination du type est faite au moyen de la formule :

$$S = \frac{\omega\sqrt{RI}}{0,0239}. \qquad (a)$$

S surface du bassin en hectares;
ω aire de la section de l'égout en mètres carrés;
$R = \frac{\omega}{\chi}$, χ étant le périmètre de la section ω;
I pente du radier en mètres par kilomètre.

Cette formule est extraite de celle de Prony $0,33v^2 = RI$; on a sup-

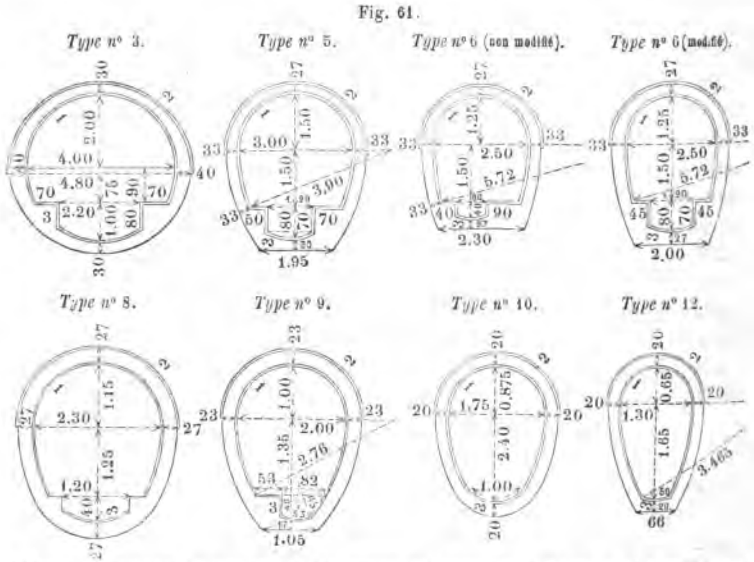
posé que la plus grande quantité de pluie qui tombe, par seconde et par hectare à Paris, est de $0^{mc},125$, et que le temps de l'écoulement dans les égouts est trois fois plus long que la durée de la pluie. La formule beaucoup plus simple $\omega = 0,1 \frac{S}{\sqrt{I}}$, qui a été proposée, donne des débouchés 3 à 6 fois trop grands.

Types d'égout actuellement en usage.

NUMÉRO du type.	DIAMÈTRE de la voûte.	HAUTEUR des pieds-droits.	SECTION de l'égout.	NUMÉRO du type.	DIAMÈTRE de la voûte.	HAUTEUR des pieds-droits.	SECTION de l'égout.
	m.	m.	m. q.		m.	m.	m. q.
1	5,60	1,00	17,76	10	1,75	1,15	3,00
2	5,20	1,05	17,91	10 *bis*	1,75	1,195	3,13
3	4,00	0,90	11,68	10 *ter*	1,75	1,225	3,08
3 surbaissé	4,00	0,60	9,22	11	1,50	1,40	2,38
4	3,70	1,05	9,89	11 *bis*	1,50	1,375	2,66
5	3,00	1,50	8,42	12	1,30	1,65	2,15
6	2,50	1,50	7,04	12 *bis*	1,40	1,35	2,46
7	2,40	1,45	6,29	13	1,30	1,45	1,96
8	2,30	1,25	4,81	14	0,90	1,55	1,63
9	2,00	1,35	4,05	15	1,00	1,25	1,66

Profils de quelques types d'égouts établis en maçonnerie de meulière et ciment.

Fig. 61.



Il y a, en outre de ces types, le grand collecteur général qui conduit en Seine, à Asnières, les liquides de toute la capitale. Ce grand collecteur a $5^{m},60$ de largeur sur $4^{m},40$ de hauteur.

Les épaisseurs indiquées sur les profils ne comprennent pas l'épaisseur 0m,02 de la chape, ni celle de l'enduit intérieur, qui est de 0m,03 pour la cunette et le dessus des banquettes, et de 0m,01 pour les pieds-droits et la voûte. Les dimensions sont comptées à l'intérieur des enduits.

S'il est possible, dans la longueur d'un égout, d'établir des déversoirs qui le déchargent de son trop-plein, le débouché ne se détermine plus au moyen de la formule précédente, mais en tenant compte des considérations suivantes :

263. Égouts-galeries. Les conduites des eaux de la ville doivent être posées dans les égouts; les principaux types admis peuvent recevoir :

Type n° 12, deux conduites de 0m,20.

Type n° 10, deux conduites de 0m,40, ou une conduite de 0m,50 et une de 0m,30, ou enfin une conduite de 0m,60 et une de 0m,20.

Type n° 9, en conservant la banquette et les rails, une conduite de 0m,30 et une de 0m,20. En conservant les rails seulement, deux conduites de 0m,30.

Type n° 8, avec rails sans banquettes, une conduite de 0m,60 et une de 0m,30, ou deux conduites de 0m,40.

Type n° 7, deux conduites de 0m,30.

Type n° 6 modifié (avec rails et grande cunette), deux conduites de 0m,40 (difficilement).

Type n° 6, sans rails et avec petite cunette, une conduite de 1m,10 et une de 0m,30.

Type n° 5, une conduite de 0m,80 et une de 0m,50 (cette dernière difficilement).

Type n° 2, deux conduites de 1m,10.

Les *types n°s 1 et* 3 sont destinés surtout à jouer le rôle de collecteurs. On doit éviter d'y placer de grosses conduites; cependant, en sacrifiant une des banquettes, on peut placer une conduite de 0m,60 dans l'égout type n° 3.

264. Cunettes. La profondeur de la cunette des types n°s 1, 2, 3, 5, 6 et 7 est variable; elle doit être déterminée d'après ce qui suit :

Pour bateaux-vannes. Les types n°s 1 et 3 ne peuvent être nettoyés facilement que s'ils reçoivent assez d'eau pour porter des bateaux-vannes; leur cunette n'est pas munie de rails. Pour que le bateau-vanne marche bien, il faut que la profondeur de la cunette soit de 1 mètre au moins.

Pour wagons-vannes. Parmi les autres types, on doit toujours choisir un des n°s 2, 5, 6 modifié et 7, lorsque l'eau est assez abondante pour faire marcher un wagon-vanne; il est nécessaire dans ce cas que la cunette ait au moins 0m,80 de profondeur.

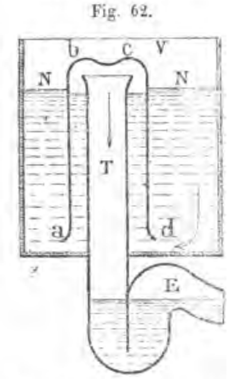
La vitesse des wagons et bateaux-vannes étant à peine de 0m,02 à 0m,03 par seconde, il faut que le nettoiement soit continu, et que par suite l'eau arrive en abondance et d'une manière continue pendant toute la journée.

Pour wagons à bascule. Lorsque l'eau arrive à l'égout en quantité insuffisante pour qu'on puisse nettoyer par le wagon-vanne, on peut réduire à 0m,40 la profondeur de la cunette, et alors on peut presque toujours adopter l'un des types 8 et 9; dans ce cas, le nettoyage s'opère avec le wagon à bascule.

Les cunettes des types n°s 2, 5, 6 modifié, 7, 8 et 9 sont toujours munies de rails.

265. Siphons. Le curage des égouts secondaires se fait au moyen des réservoirs de chasse construits en maçonnerie aux points hauts de ces égouts. Ces réservoirs contiennent 6 à 10 mètres cubes d'eau. Ils fonctionnent automatiquement au moyen d'un siphon ou à la volonté du service, qui a à sa disposition une vannette à main permettant de prélever sur le réservoir le volume d'eau nécessaire aux besoins du moment. Voici le principe d'un réservoir de chasse. Soit V le réservoir. Une cloche *abcd* est fermée à sa partie supérieure et ouverte à la partie inférieure *ad*. A mesure que le vase V reçoit de l'eau par sa partie supérieure, l'eau pénètre dans l'intervalle situé entre la cloche *abcd* et le tube T ouvert à sa partie supérieure. Lorsque, dans cet intervalle, l'eau présente le même niveau que le niveau NN du vase, cette eau se déverse dans le tube T qui forme siphon et toute l'eau du vase V s'écoule par T et par suite dans l'égout E. Le fonctionnement est donc entièrement automatique.

Fig. 62.



266. Pentes. Les pentes des égouts types nos 1 et 3 qui doivent recevoir des bateaux-vannes doivent être comprises entre $0^m,30$ et $0^m,50$ par kilomètre.

Les pentes des égouts nettoyés par les wagons-vannes peuvent s'abaisser à $0^m,50$ et s'élever jusqu'à 5 mètres par kilomètre. Au-dessus de 5 mètres, les wagons-vannes deviennent inutiles.

Lorsque les pentes sont très longues et dépassent 10 mètres par kilomètre, l'emploi des wagons à bascule devient dangereux; les rails doivent être supprimés, et l'un des types nos 10 ou 12 suffit presque toujours, sauf le cas où la galerie doit renfermer des conduites de très grand diamètre. (Voir ci-dessus *Égouts-galeries.*)

Les égouts sans rails qui reçoivent peu d'eau doivent avoir $1^m,50$ de pente au moins par kilomètre. La pente peut être portée sans inconvénient jusqu'à 50, et même, dans les galeries courtes, jusqu'à 80 mètres par kilomètre. Il est très bon de se tenir aussi près que possible de ces limites supérieures, pour faciliter le nettoiement.

267. Longueur des égouts. Égouts à grande section. La longueur des égouts à wagons et à bateaux-vannes est indéfinie; celle des autres égouts à rails ne doit pas dépasser 2000 mètres, lorsque la pente est faible et que la galerie reçoit des boues de chaussées macadamisées.

Égouts à petite section. La longueur des égouts types nos 10 et 12 doit être réglée de telle sorte que les vases et les sables puissent être poussés jusqu'à un égout à rails, sans qu'il soit nécessaire d'en extraire aucune partie sur la voie publique.

Lorsque la pente du radier est forte, qu'elle dépasse, par exemple, 10 mètres par kilomètre, la longueur de l'égout peut être très grande, parce que le nettoiement s'opère sans difficulté avec une très petite quantité d'eau.

Lorsque la pente est faible, on peut encore pousser les vases à de très grandes distances, si l'égout ne reçoit que des eaux de chaussées pavées; on peut, avec cette condition, porter à 1 kilomètre et plus la longueur de l'égout. Mais il n'en est plus de même lorsque l'égout à faible pente reçoit les eaux d'une voie macadamisée fréquentée; sa longueur, dans ce cas, doit être de 300 mètres au plus.

268. Courbes. Les courbes de la cunette des égouts types n°s 1 et 3 doivent avoir d'assez grands rayons pour qu'on puisse y faire circuler un bateau-vanne; la longueur minimum du rayon peut être de 60 mètres.

Les rayons des courbes des égouts à rails doivent avoir de 25 à 30 mètres de longueur au minimum. Lorsque les carrefours des rues sont trop resserrés pour qu'on obtienne le minimum, on brise l'axe de la galerie et l'on place une plaque tournante au sommet de l'angle. Mais il faut éviter, autant que possible, l'emploi de ces plaques, qui arrêtent les corps flottants et gênent beaucoup le nettoiement.

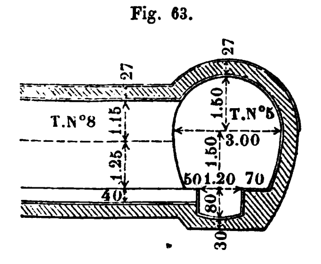
Les égouts sans rails peuvent être construits suivant des lignes droites, courbes ou brisées; la disposition des lieux indique généralement la forme qui doit être adoptée.

Jonctions d'égouts. Gradins. On doit toujours établir un gradin à la jonction de deux égouts, de telle sorte que l'eau et les vases de la galerie principale refluent le moins possible dans la galerie secondaire.

Dans les *égouts à rails ou à banquettes*, types n°s 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, les rails ou les banquettes doivent évidemment se raccorder de niveau; la hauteur du gradin est donc déterminée par la différence qui existe entre les profondeurs des cunettes (*fig.* 63).

Les radiers d'égouts sans rails et sans banquettes doivent déboucher dans les égouts à wagons ou à bateaux-vannes à $0^m,25$ ou $0^m,30$ en contre-bas des banquettes. Dans les autres égouts à rails, on peut réduire la hauteur du gradin à $0^m,20$. Il est bon de terminer la galerie secondaire par un plan incliné rapide pour y diminuer la longueur du remous des vases.

Fig. 63.



La hauteur des gradins, à la rencontre de deux égouts sans rails, doit être comprise entre $0^m,15$ et $0^m,30$.

On doit construire plusieurs gradins à la rencontre des égouts anciens lorsque la différence de niveau des radiers l'exige, ou dans les jonctions d'égouts neufs lorsque le raccord des galeries par un seul gradin ne peut se faire sans dépasser la limite supérieure de pente indiquée ci-dessus pour les égouts en question.

269. Raccords des voûtes. Lorsque deux égouts se rencontrent, la pénétration des voûtes se fait sans difficulté si les deux galeries sont de types différents, ou sont à rails et de même type.

Mais lorsque les deux galeries sont sans rails et de même type, le raccord est un peu plus difficile à cause du gradin. Il convient alors, comme l'indique le croquis (*fig.* 64), de tenir l'égout tributaire à un niveau supérieur à celui de l'égout qui en reçoit le produit.

Fig. 64.

Les égouts étant tous construits en maçonnerie brute, et enduits à l'intrados, aucun appareil spécial n'est nécessaire à la jonction de deux voûtes.

270. Profondeurs des tranchées. La profondeur des tranchées doit être telle que la hauteur minimum du remblai, au-dessus de l'extrados de la clef de voûte, soit de 1 mètre. Dans des cas exceptionnels, et sur de très petites longueurs, on peut faire descendre ce minimum à $0^m,40$.

On ne doit jamais établir plusieurs gradins à la jonction de deux égouts, uniquement pour diminuer la profondeur de la tranchée. A l'origine ou au heurt de l'égout, cette profondeur doit se rapprocher, autant que possible, du minimum; de telle sorte que la pente soit aussi grande que le permettent la disposition des lieux et le type de la galerie.

Ces dernières prescriptions sont extrêmement importantes; le nettoiement des égouts exige qu'on se tienne aussi près que possible du maximum des pentes, et aucune considération d'économie ne doit faire diminuer la pente, lorsqu'il s'agit d'atteindre ce but.

271. Choix des matériaux. On peut, à volonté, construire les égouts, soit en maçonnerie de meulière et mortier de chaux hydraulique, soit en maçonnerie de meulière et mortier de ciment; les épaisseurs, dans ce dernier cas, étant diminuées de 1/3.

Il est un cas néanmoins où le choix est indiqué d'avance, c'est lorsque l'égout pénètre dans la nappe d'eau des puits; dans ce cas, la maçonnerie de ciment est préférable.

Les égouts qui reçoivent une très grande quantité d'eau doivent avoir aussi leur cunette au moins construite en maçonnerie de ciment.

Les égouts types n°s 8, 9 et 10, destinés à recevoir de grosses conduites, sont toujours construits avec mortier de chaux hydraulique, jusqu'à $0^m,30$ au-dessus des naissances au moins, afin d'avoir l'épaisseur de maçonnerie nécessaire pour sceller les consoles.

272. Smillage, jointoiements, enduits et chape. Depuis longtemps on remplace le smillage et le jointoiement des parements par un léger enduit en ciment. Les égouts enduits sont beaucoup plus faciles à nettoyer et à éclairer, et leur sonorité est plus grande.

Les enduits minces doivent avoir $0^m,005$ au moins d'épaisseur, sur les parties les plus saillantes des meulières.

L'épaisseur des enduits des radiers, des cunettes et des banquettes doit être de $0^m,03$, rocaillage non compris.

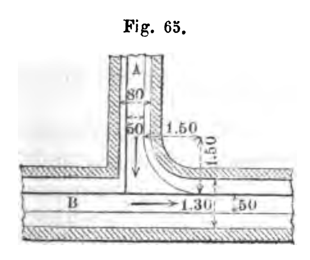
La chape de la voûte est en mortier de chaux hydraulique, si l'égout est construit en meulière et mortier de chaux; elle est en mortier de

ciment et de $0^m,02$ d'épaisseur, si l'égout est construit en meulière et mortier de ciment.

273. Bouches d'égout. L'odeur fade qui s'exhale assez souvent, dans la saison chaude, des bouches d'égout, provient presque toujours des branchements de bouche et non de l'égout.

Il faut donc disposer les branchements de telle sorte qu'ils soient facilement accessibles, et à cet effet leur donner des dimensions convenables.

Fig. 65.



Sur les contre-allées très larges, il y a quelquefois deux caniveaux dont les eaux tombent dans le même branchement de bouche; en pareil cas, la cheminée intermédiaire ne doit pas être établie dans l'axe du branchement, mais à côté, de telle sorte que l'eau ne tombe pas sur les ouvriers.

L'angle d'aval, à la jonction d'un branchement A de bouche et d'un égout B, doit être arrondi, ainsi que l'indique la figure 65, afin que les deux courants ne se coupent pas à angle droit. Cette disposition n'est pas utile dans les égouts types n°s 1, 2, 3, 5 et 6 modifié.

Les parements des bouches et leurs branchements doivent être enduits comme ceux des égouts, les parements smillés étant d'un nettoyage très difficile.

274. Regards. Les regards doivent être espacés de 50 mètres d'axe en axe.

Lorsqu'un regard, par suite de la disposition du trottoir, ne peut pas être établi à sa place réglementaire, il doit être disposé de telle sorte que la somme de ses distances aux deux regards voisins soit rigoureusement de 100 mètres.

Les regards sont toujours construits sur les trottoirs, afin de supprimer les trappes, si gênantes pour la circulation des voitures.

Lorsque l'égout est lui-même sous le trottoir, le regard se compose d'une simple cheminée, établie ordinairement dans l'axe de la galerie.

Lorsque l'égout est sous la chaussée, chaque regard se compose d'une cheminée et d'un branchement.

Les cheminées de regard sont placées alternativement sous l'un et l'autre trottoir, sauf dans le cas où la ligne maîtresse renferme une grosse conduite qui gêne le passage; dans ce cas, les regards sont tous établis du côté opposé.

275. Gradins des branchements. Organeaux. Dans les collecteurs qui peuvent être envahis brusquement par de grandes masses d'eau, il faut établir le plus grand nombre possible de gradins dans les branchements de regard, afin que les ouvriers y trouvent un refuge au-dessus du niveau de l'eau. Cette précaution est indispensable, même dans beaucoup de petits égouts qui suivent des lignes de thalweg, comme ceux des rues du Bac et de Richelieu, ou longent le pied d'un coteau.

Des *organeaux* doivent être établis de 25 en 25 mètres, dans les collecteurs et égouts à rails, et disposés par paire, bien en face l'un de l'autre, afin qu'en cas d'averse les ouvriers puissent en peu de temps amarrer convenablement leurs wagons et leurs bateaux.

276. Exécution des maçonneries. Les blocs de meulière qui forment le corps de l'égout ne doivent pas être disposés par arases horizontales, comme c'est l'usage dans les massifs de maçonnerie, mais normalement à la surface de la paroi intérieure. Ainsi les blocs qui forment le radier doivent être posés sur *champ* et non *à plat*, et il en est de même des blocs formant la dernière arase des banquettes.

277. Enduits et rocaillages. Les enduits sont toujours posés sur un rocaillage en mortier de ciment.

Lorsque le rocaillage s'applique sur un parement de maçonnerie de chaux hydraulique, les joints doivent être préalablement dégradés sur $0^m,05$ au moins, bien brossés et lavés à grande eau. Lorsque la maçonnerie a été faite avec du mortier de ciment, on se contente d'abattre les balèvres de manière à faire pénétrer le mortier nouveau dans tous les vides du parement, de piquer les surfaces trop lisses et de les nettoyer avec soin.

Dans le premier cas, le rocaillage doit être général, de telle sorte que l'enduit ne porte en aucun point sur du mortier de chaux. Dans le second cas, le rocaillage n'a d'autre but que de régulariser la surface de la maçonnerie, pour économiser le mortier de ciment.

Le mortier de rocaillage est composé, en volume, de deux parties de ciment et cinq de sable; celui de l'enduit, de parties égales de ciment et de sable; l'emploi du ciment pur est interdit.

Le mortier doit être appliqué sur le rocaillage au moyen de la *taloche*, qui a la propriété de ne pas énerver le ciment; le dressage doit être aussi parfait que possible; mais comme la taloche entraîne toujours quelques grains de sable qui rayent les enduits, on termine le travail en passant sur toute la surface, d'abord la brosse de chiendent, puis le pinceau humide.

Cette dernière main-d'œuvre, qui n'est pas admise dans les règles de la construction ordinaire, est indispensable pour faciliter le nettoyage et l'éclairage de l'égout.

278. Boisage et responsabilité de l'entrepreneur. Il est d'usage à Paris d'opérer l'étrésillonnement de la tranchée jusqu'à 1 mètre au-dessus du fond; la disposition des plats-bords est telle qu'il y a moitié plein, moitié vide; les fermes sont espacées de 2 mètres; les prix sont établis en admettant ces dispositions; le boisage étant payé à forfait, l'entrepreneur est complètement responsable de la conservation de la fouille, et de tous les accidents qui peuvent résulter de l'insuffisance du boisage : il peut donc à volonté augmenter ou diminuer la quantité de bois, sans qu'il y ait lieu d'augmenter ou de diminuer le prix du mètre courant de galerie, et sans que l'ingénieur intervienne, à moins qu'il n'y ait imprudence et péril en la demeure.

279. Égouts dans la nappe d'eau des puits. Lorsque l'égout pénètre

dans la nappe d'eau des puits, le boisage n'est payé à forfait que jusqu'au niveau de cette nappe, et toujours en supposant moitié plein, moitié vide.

En effet, dans ce cas la galerie se fait en deux parties. On construit d'abord, en suivant les règles ordinaires, la partie située au-dessus de l'eau, en boisant jusqu'à 1 mètre au-dessus du fond; on achève le travail par reprise en sous-œuvre, et après avoir fait baisser l'eau au-dessous du niveau du radier par des épuisements énergiques. (Le sable fin dans lequel coule la nappe d'eau des puits de Paris, qui est très mobile tant qu'il est dans l'eau, devient très ferme après l'épuisement. On fait baisser l'eau en ouvrant dans l'axe de l'égout une rigole boisée jointivement; l'espacement des puisards est de 80 à 100 mètres. L'épuisement se fait au moyen de pompes mises en mouvement par des machines locomobiles de 3 à 4 chevaux.)

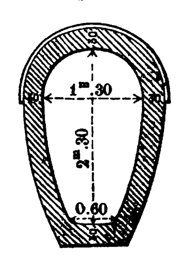
Evidemment, on ne peut comprendre dans le forfait établi *a priori* ni les épuisements, ni le forage des puits, ni le boisage de la partie inférieure de la tranchée, ni le creusement de la galerie d'épuisement dans les terres mouillées. Ces travaux ne peuvent s'exécuter qu'en régie ou à la tâche, à prix débattus.

280. Égouts particuliers. Arrêté par lequel le préfet de la Seine, d'après l'article 6 du décret du 26 mars 1852 sur la grande voirie de Paris (voir ce décret à la *Cinquième partie*), et un arrêté préfectoral du 19 décembre 1854, a autorisé ou prescrit l'exécution d'un branchement d'égout particulier :

ART. 1er. Le propriétaire de la maison indiquée ci-contre (en marge) *est requis* de faire écouler ses eaux dans l'égout public, en se conformant aux prescriptions suivantes :

Un branchement présentant en coupe les dimensions de la figure 66 sera construit entre l'égout public et le mur de face de la propriété. Son radier sera disposé selon le maximum de pente disponible, de manière à se raccorder avec celui de l'égout public à $0^m,15$ en contre-haut à la rencontre de ce dernier. Ce branchement sera construit en maçonnerie de meulière avec mortier de chaux hydraulique. Le minimum d'épaisseur du radier, des pieds-droits et de la voûte sera de $0^m,30$. Les parements seront smillés ou recouverts d'un enduit en ciment de $0^m,02$ d'épaisseur; l'enduit du radier sera fait en ciment et aura $0^m,05$ d'épaisseur (282).

Fig. 66.



Si les eaux de l'intérieur sont amenées dans le branchement par un tuyau, il sera établi au droit dudit tuyau un glacis de 1 mètre de longueur sur $0^m,50$ de hauteur au minimum. Le radier sera construit sur toute la longueur du branchement; l'enduit en ciment sera seul supprimé dans la partie correspondante au glacis.

Les tuyaux de descente éloignés du branchement pourront être prolongés sous le trottoir jusqu'au branchement, à la condition qu'ils auront une pente de $0^m,20$ par mètre.

Une grille en fer, établie à l'aplomb du mur de face, interceptera la communication de la maison avec l'égout. Cette grille aura une serrure à deux clefs dissemblables, dont l'une restera entre les mains du propriétaire et l'autre sera remise à l'administration.

Pour la ventilation permanente du canal de dérivation, il sera pratiqué une cheminée d'appel s'ouvrant au-dessus des combles et présentant une section de 3 décimètres carrés au moins.

Le branchement d'égout sera disposé de manière à recevoir les tuyaux de concession d'eau, qui devront être placés dès l'achèvement du branchement.

Les conduites de gaz rencontrées par le branchement seront isolées de la maçonnerie par 1 ou 2 demi-manchons en fonte : aux frais du propriétaire, si la conduite préexiste; aux frais de la compagnie d'éclairage, si la pose de la conduite est postérieure à l'établissement du branchement.

Un numéro, exactement semblable à celui de la maison, sera placé, aux frais du propriétaire, dans l'égout public, au débouché du branchement. Ce numéro sera scellé dans l'emplacement désigné par les agents du service municipal.

Art. 2. Tous ces ouvrages seront exécutés sous la surveillance des agents du service municipal et aux frais, risques et périls du propriétaire. Celui-ci ou ses ayants droit supporteront toutes les dépenses d'entretien et de curage, et celles de réparation des dégradations faites à l'égout public par les eaux dont l'écoulement est autorisé par le présent arrêté. Les travaux sur l'égout public et ceux de pavage, empierrement et dallage sur tranchées seront exécutés par les soins de l'administration, et la dépense sera recouvrée sur le propriétaire, d'après les règlements.

Art. 3. Le propriétaire ou ses ayants droit ne pourront faire écouler dans le branchement dont il s'agit que des eaux pluviales, ménagères ou de lavage; il leur est expressément interdit d'y faire couler des eaux-vannes de fosses d'aisances ou tout autre liquide pouvant nuire à la salubrité des égouts. Ils devront se conformer d'ailleurs à tous les règlements d'administration et de police faits et à faire sur le régime des égouts.

Art. 4. Faute par le propriétaire de pratiquer l'écoulement autorisé, ou de remplir les conditions prescrites, le fait constaté sera poursuivi comme une contravention de grande voirie.

Art. 5. Dans le cas où les besoins du service public exigeraient la modification ou la suppression de l'écoulement dont il s'agit, le propriétaire ou ses ayants cause seront obligés de se soumettre aux prescriptions de l'administration, sans avoir droit à aucune indemnité, pour quelque cause que ce soit.

Art. 6. *Les travaux devront être terminés dans un délai de quinze jours, à partir de la notification du présent arrêté.*

Le propriétaire devra prévenir, trois jours avant de mettre la main à l'œuvre, l'ingénieur ordinaire de la section, demeurant rue...

Art. 7. L'ingénieur en chef des eaux et des égouts est chargé de notifier le présent arrêté, d'en surveiller l'exécution, et de faire connaître l'époque de l'achèvement des travaux.

En outre des dispositions-types de l'arrêté précédent, l'administration autorisait les suivantes :

Le minimum d'épaisseur fixé à 0m,30 pour le radier, les pieds-droits et la voûte des branchements particuliers peut, comme on le fait pour les égouts publics (259), être réduit à 0m,20 lorsque la maçonnerie, au lieu d'être en meulière et mortier de chaux hydraulique, est faite en meulière et mortier de ciment romain.

La cheminée de ventilation n'est pas immédiatement exigible pour les maisons anciennes, sauf le cas de reconstruction complète de la façade.

Lorsque les dimensions de l'égout public et l'altitude de la voie ne permettent pas de donner à la galerie particulière la hauteur réglementaire de 2m,30, avec les 0m,40 au moins de remblais entre l'extrados de la voûte et le dessous des pavés, on la construit néanmoins avec cette hauteur de 2m,30, et l'on place son radier à 3m,05 au moins en contre-bas de la surface du sol; le radier est ensuite rechargé par une couche de béton, à laquelle on donne une épaisseur et une pente suffisantes. Ce faux radier est destiné à être supprimé au moment de la reconstruc-

tion de l'égout public ou de l'abaissement de son radier à l'altitude voulue pour satisfaire aux prescriptions réglementaires.

Quand il y a moins de 1 mètre de distance entre la maison et l'égout public, il n'y a pas lieu de faire un faux radier toutes les fois que la différence du niveau du point le plus bas de la voie publique et du radier de l'égout public est de plus de 3m,05. Ce nombre doit être augmenté de 2 millimètres par mètre de distance de la maison à l'égout public.

Lorsque les eaux d'une maison sont amenées dans le branchement d'égout particulier par un tuyau, la prise d'eau à la hauteur des ruisseaux ou des caniveaux est ordinairement formée par une cuvette hydraulique à siphon, ayant pour but d'intercepter le passage aux émanations de l'égout (265). Cette cuvette s'adapte à la partie supérieure du tuyau de chute, dont l'extrémité inférieure débouche dans le branchement sur le glacis réglementaire établi devant le mur-pignon adossé au mur de la maison. Le tuyau dechute a ordinairement 0m,22 de diamètre.

On a fait aussi l'application d'une cuvette composée d'un simple récipient posé sur le glacis, et dans l'eau duquel l'extrémité inférieure du tuyau de chute plonge de quelques centimètres.

La fermeture hydraulique qui en résulte permet de supprimer la cuvette à siphon formant prise d'eau, en la remplaçant par un simple récipient à grille, dont on garnit l'extrémité supérieure du tuyau de chute, à la hauteur du ruisseau. Pour que cette nouvelle cuvette ne donne pas d'odeur, il faut que le tuyau d'eau ménagère ne reçoive aucun branchement entre le sol de la cour et le radier de l'égout.

En dehors de cette cuvette, imaginée par Belgrand, ingénieur en chef du service municipal, et établie en fonte par M. Godefroi, les systèmes de cuvettes à siphon qui paraissent donner les meilleurs résultats sont ceux avec coussin en caoutchouc de M. Rogier-Mothes, de MM. Guss et Truffat et de M. Damour.

Aux termes de l'arrêté préfectoral, les tuyaux de concession d'eau seront placés dans les branchements d'égouts particuliers dès que ceux-ci seront construits. Alors, les robinets d'arrêt de ces tuyaux doivent être manœuvrés sous bouche à clef, et pour que la clef n'ait pas une longueur exagérée, il est nécessaire que la distance entre l'extrados de la clef de voûte du branchement et le sol du trottoir ne dépasse pas de beaucoup 1m,30. Quand cette distance doit être dépassée, on élève le branchement particulier par un nombre suffisant de gradins, ou, si cette disposition n'est pas possible, on élève la voûte du branchement, sur une longueur de 1 mètre contre le mur de façade, de manière à former une cheminée disposée de telle sorte que la conduite d'eau ne s'y trouve pas à plus de 1m,30 en contre-bas de la surface du sol.

Circulaire adressée par chaque maire aux propriétaires de son arrondissement qui doivent faire établir des égouts particuliers.

Conformément aux instructions de M. le préfet de la Seine, M.   , propriétaire de la maison rue   , n°   , est invité à venir à la mairie prendre connais-

sance du projet d'un embranchement d'égout, dont la construction, pour le service de son immeuble, lui est imposée par l'article 6 du décret du 26 mars 1852.

Le projet dont il s'agit restera déposé au secrétariat de la mairie pendant huit jours (qui sont désignés). Un procès-verbal sera ouvert pour recevoir les observations de l'intéressé.

On appelle l'attention du propriétaire sur les dispositions des décret et arrêtés dont le texte est ci-après et qui réglementent la construction et l'entretien des branchements ainsi que l'écoulement continu des liquides des fosses d'aisances dans les égouts publics.

Enfin, on lui fait remarquer que les nécessités de la circulation et la sécurité publique exigent, selon les circonstances, que les travaux soient exécutés par mesure collective (à la fois pour plusieurs propriétés voisines) et confiés à un entrepreneur unique.

M.   est, en conséquence, convoqué à la mairie le   , afin de se concerter avec ses co-intéressés peur le choix de cet entrepreneur unique.

281. Dispositions d'exécution. *Branchements en maçonnerie.* (*Arrêté préfectoral du* 19 *décembre* 1854.)

Art. 1er. A l'avenir, la projection directe, dans les égouts publics, des eaux pluviales et ménagères des maisons de Paris, que prescrit l'article 6 du décret du 26 mars 1852, aura lieu par des galeries souterraines en maçonnerie. . . . .

Une grille en fer, établie à l'aplomb du mur de face, interceptera la communication de la maison avec l'égout. Cette grille aura une serrure à deux clefs, dont l'une restera entre les mains du propriétaire et l'autre sera remise à l'administration . . . .

. . . .

Art. 3. En cas d'avaries, les tuyaux de drainage existant aujourd'hui seront remplacés conformément aux prescriptions de l'article 1er du présent arrêté.

282. Branchements d'égouts. (*Arrêté du* 28 *octobre* 1881.)

Vu les arrêtés préfectoraux, en date des 2 juillet 1879 et 14 janvier 1880, qui ont fixé les dimensions réduites des branchements particuliers d'égout (280) pour le drainage des maisons aux proportions suivantes :

1° Pour les branchements d'une longueur inférieure à 2 mètres, savoir :

Hauteur sous clef	1m,00
Largeur aux naissances	0 ,60
— au radier	0 ,40

2° Pour les branchements d'une longueur supérieure à 2 mètres, savoir :

Hauteur sous clef	1m,40
Largeur aux naissances	0 ,60
— au radier	0 ,40

Vu le procès-verbal de la séance du 22 mai dernier, dans lequel la commission d'études pour la ventilation et l'assainissement des égouts expose les inconvénients de l'application de ce nouveau type d'égout qui ne permet ni de curer complètement ces galeries, ni de les réparer en cas d'engorgement ou de dégradations, ni de poser ou de réparer les conduites d'eau ou autres ouvrages qu'elles doivent renfermer;

Vu la délibération du conseil municipal, en date du 6 août 1881, portant qu'il y a lieu, pour remédier aux inconvénients signalés, de donner aux branchements particuliers d'égout une section minimum de 2 mètres de hauteur et de 1m,30 de largeur;

Vu la délibération rectificative du Conseil municipal, en date du 22 de ce mois, ramenant la section des branchements particuliers d'égout à une hauteur de 1m,80 et une largeur de 0m,90,

Arrête :

Art. 1er. La délibération susvisée du conseil municipal de Paris, en date du 22 octobre 1881, est approuvée. En conséquence, les arrêtés des 2 juillet 1879 et 14 janvier 1880 sont rapportés dans celles de leurs dispositions qui sont contraires aux dimensions prescrites par les articles qui suivent.

Art. 2. Les branchements particuliers d'égout desservant les propriétés devront désormais avoir, quelle que soit leur longueur, une section minima de 1m,80 de hauteur et de 0m,90 de largeur.

Art. 3. Les propriétaires d'immeubles d'un revenu imposable inférieur à 3.000 francs et situés en bordure sur les voies de petite communication continueront à bénéficier de la faculté de poser des tuyaux en grès ou en fonte pour l'écoulement de leurs eaux.

Art. 4. L'inspecteur des ponts et chaussées, directeur des travaux de Paris, est chargé de l'exécution du présent arrêté, dont ampliation sera transmise :

1° A M. le ministre de l'intérieur;
2° A M. le préfet de police;
3° Aux maires des vingt arrondissements de Paris;
4° A l'ingénieur en chef de la voie publique (1re division);
5° A l'ingénieur en chef de la voie publique (2e division);
6° A l'ingénieur en chef des eaux et des égouts (1re division);
7° A l'ingénieur en chef des eaux et des égouts (2e division);
8° A l'ingénieur en chef des promenades et plantations;
9° Au secrétariat général, 1re division, 2e bureau, pour insertion au *Recueil des Actes administratifs;*
10° A la Compagnie générale des eaux.

283. Construction par les propriétaires. (*Arrêté préfectoral du 14 février 1872.*)

Projet et autorisation. Art. 1er. Tout branchement d'égout particulier à établir au compte des propriétaires sera l'objet d'un projet estimatif dressé par les ingénieurs des eaux et des égouts aux frais de l'administration et d'après les indications fournies par les propriétaires, puis d'un arrêté formulant les conditions de l'autorisation.

Choix de l'entrepreneur par le propriétaire. Art. 2. La galerie et ses accessoires sous la voie publique seront exécutés par l'entrepreneur du choix du propriétaire. Cet entrepreneur devra représenter à l'ingénieur de la section l'autorisation écrite du propriétaire, et être en mesure de justifier à toute réquisition d'un certificat de capacité délivré depuis moins d'un an par un ingénieur des ponts et chaussées, et visé pour chaque travail par l'ingénieur en chef des eaux et des égouts.

Exécution sur réquisition. Branchements isolés. Art. 3. Quand l'administration requerra l'établissement d'un ou de plusieurs branchements, le projet des travaux sera communiqué à chaque propriétaire intéressé par l'intermédiaire du maire de l'arrondissement sur le territoire duquel le travail est projeté.

Dans un délai de huit jours, à compter de l'avis du maire, chacun pourra consigner ses observations dans un procès-verbal ouvert à cet effet. Le projet, après avoir été revu et modifié, s'il y a lieu, sera approuvé par un arrêté spécial qui fixera le délai dans lequel chaque propriétaire devra faire exécuter les travaux à sa charge par l'entrepreneur qu'il aura choisi. Cet arrêté sera notifié à chacun des intéressés.

Faute par le propriétaire de se conformer aux prescriptions de l'arrêté, les ingénieurs pourvoiront d'office à l'exécution des travaux par les entrepreneurs ordinaires de la ville, et les dépenses avancées par l'administration seront recouvrées par toutes les voies de droit.

Branchements collectifs. Art. 4. Si les branchements doivent être faits par mesure collective dans une rue ou portion de rue pour l'exécution totale ou le complément de drainage de cette rue, et s'il est reconnu que les travaux ne peuvent être confiés à plusieurs entrepreneurs sans compromettre la liberté de la circulation et la sécurité publique, l'enquête aura lieu comme il est dit à l'article précédent, et les propriétaires seront invités à se réunir dans un local au jour et à l'heure déterminés par le maire, à l'effet de se concerter pour le choix d'un entrepreneur unique qui exécutera l'ensemble des travaux.

Dans le délai de huit jours, le maire constatera s'il y a accord entre les propriétaires et fera connaître à la préfecture le nom et la demeure de l'entrepreneur choisi.

Si les propriétaires n'ont pu s'entendre entre eux, il sera procédé, quelle que soit l'importance des travaux, par les soins de l'administration, à une adjudication publique au rabais, en conseil de préfecture, et l'opération entière sera confiée à l'entrepreneur qui aura été déclaré adjudicataire.

Chaque propriétaire sera invité individuellement à assister à l'adjudication. Le résultat de celle-ci lui sera notifié et sera déclaré définitif par le préfet, après un délai de huitaine à compter du jour de la notification, délai pendant lequel les intéressés pourront présenter leurs observations.

Exécution des ouvrages. Art. 5. Dans tous les cas, les travaux seront exécutés sous la surveillance des ingénieurs de l'administration, selon les prescriptions des arrêtés préfectoraux susvisés. Les entrepreneurs se conformeront aux clauses et conditions générales imposées aux entrepreneurs des ponts et chaussées, tant par l'arrêté du ministre des travaux publics du 16 novembre 1866 que par les devis des entreprises d'entretien du service municipal de Paris.

Mesures d'office. Si un entrepreneur n'observe pas quelqu'une de ces conditions, notamment dans le cas où, après avoir ouvert une tranchée sur la voie publique, il abandonne le travail commencé, l'ingénieur en chef donnera avis de l'état des choses au propriétaire ou à son représentant, et pourra, après un ordre de service notifié à l'entrepreneur, non suivi d'effet, dans les vingt-quatre heures, soit faire remblayer la tranchée, soit confier la continuation du travail à l'entrepreneur de l'administration. Il rendra compte immédiatement au préfet des mesures qui auront été prises. L'entrepreneur qui aura été l'objet de ces mesures sera exclu de tout travail d'égout dans les rues de Paris, pour l'avenir.

Payement direct par le propriétaire à l'entrepreneur. Art. 6. Chaque propriétaire s'entendra, pour le payement de la dépense, directement et sans intervention ni garantie de la part de l'administration, avec l'entrepreneur qui aura exécuté les travaux dans les conditions des articles 2, 3 et 4 susvisés. Il pourra toutefois faire vérifier par l'ingénieur de la section le métré des ouvrages porté au mémoire de l'entrepreneur.

Raccordements et travaux d'office. Art. 7. Les raccordements et la réfection définitive des chaussées, trottoirs et dallages au-dessus des tranchées, continueront d'être faits par les entrepreneurs de l'administration pour la voie publique. La dépense en sera payée par la Ville et remboursée à celle-ci par le propriétaire, conformément aux règles et suivant les tarifs fixés pour ces travaux.

Les dépenses faites d'office dans le cas du paragraphe 2 de l'article 5 seront de même payées par la Ville, à laquelle elles seront remboursées par le propriétaire, en même temps que les frais de raccordement.

Préalablement à la mise en recouvrement de ces avances, le métrage des divers travaux et le décompte des dépenses seront notifiés à chaque propriétaire, qui aura cinq jours après cette notification pour présenter ses observations au bureau de l'ingénieur ordinaire. Passé ce délai, il sera passé outre à l'émission de l'arrêté de recouvrement.

Charges et modes d'entretien. Art. 8. Toutes les règles ci-dessus sont applicables à l'entretien des branchements d'égout et de leurs accessoires sur la voie publique, qui reste à la charge des propriétaires, quels que soient l'époque ou le mode de construction.

Responsabilité des propriétaires. Art. 9. Chaque propriétaire est responsable, soit vis-à-vis de l'administration, soit vis-à-vis des tiers, de l'existence et de l'entretien des ouvrages établis tant à l'extérieur qu'à l'intérieur pour le drainage de son immeuble.

Art. 10. Toutes les dispositions des arrêtés préfectoraux susvisés non contraires au présent arrêté sont maintenues.

Art. 11. Le directeur des eaux et des égouts est chargé de l'exécution du présent arrêté, qui sera inséré au *Recueil des actes administratifs.*

284. Le tout à l'égout. *Règlement pour l'écoulement des matières de vidange dans les égouts de Paris par voie directe.* (*Arrêté du préfet de la Seine du* 10 *novembre* 1886.)

Art. 1er. Dans toutes les rues pourvues de collecteurs à bateaux ou à rails, ou d'égouts munis de réservoirs de chasse, les propriétaires de maisons en bordure sur la voie publique pourront faire écouler directement à l'égout les eaux pluviales et ménagères, ainsi que les matières de vidange de leurs immeubles.

A cet effet, ils souscriront des abonnements qui seront approuvés par des arrêtés préfectoraux, sur l'avis de l'ingénieur en chef de l'assainissement.

Ces abonnements seront annuels et révocables à la volonté de l'administration.

Conditions d'abonnement. Ils partiront des 1er janvier et 1er juillet de chaque année.

ART. 2. Les conditions à remplir pour l'abonnement sont les suivantes :

Concession d'eau. 1° La propriété sera desservie par les eaux de la Ville.

Branchement d'égout. 2° Elle sera pourvue d'un branchement particulier d'égout.

Cabinet d'aisances. 3° Tout cabinet d'aisances devra être muni de réservoirs ou d'appareils branchés sur la canalisation, permettant de fournir dans ce cabinet une quantité d'eau de 10 litres au minimum par personne et par jour.

L'eau ainsi livrée dans les cabinets d'aisances devra arriver dans les cuvettes de manière à former une chasse d'eau suffisamment vigoureuse.

Les appareils qui la distribueront seront examinés par le service de l'assainissement et devront être reçus par l'administration avant leur mise en service.

Toute cuvette de cabinet d'aisances sera munie d'un appareil formant fermeture hydraulique et permanente.

Ces dispositions seront applicables aux cabinets d'aisances des ateliers, des magasins, des bureaux et en général de tous les établissements qui reçoivent une nombreuse population pendant le jour.

Eaux ménagères et pluviales. 4° Il sera placé une inflexion siphoïde formant fermeture hydraulique à l'origine supérieure de chacun des tuyaux d'eaux ménagères.

Les tuyaux de descente des eaux pluviales seront munis d'obturateurs interceptant toute communication directe avec l'atmosphère de l'égout.

Les tuyaux devront être aérés d'une manière continue.

Tuyaux de chute et conduites d'eaux ménagères et pluviales. 5° Les conduites d'eaux ménagères, les conduites d'eaux pluviales et les tuyaux de chute destinés aux matières de vidange ne pourront avoir de diamètre inférieur à 0m,08 ni supérieur à 0m,16.

Les chutes des cabinets d'aisances avec leurs branchements ne pourront être placées sous un angle supérieur à 45° avec la verticale.

Chaque tuyau de chute sera prolongé au-dessus du toit jusqu'au faîtage et librement ouvert à la partie supérieure.

La projection des corps solides, débris de cuisine, de vaisselle, etc., dans les conduites d'eaux ménagères et pluviales, ainsi que dans les cuvettes des cabinets d'aisances, est formellement interdite.

Le tracé des tuyaux secondaires partant du pied des tuyaux de chute et des conduites d'eaux ménagères sera prolongé dans les cours et caves jusqu'au tuyau général d'évacuation.

Il en sera de même pour les conduites des eaux pluviales, si le tuyau d'évacuation peut recevoir ces eaux.

Le tracé de ces tuyaux devra être formé de parties rectilignes.

A chaque changement de direction ou de pente, il sera ménagé une tubulure ou un regard de visite et d'aération facilement accessible.

Évacuation directe à l'égout. 6° Les tuyaux d'évacuation auront une pente minima de 0m,03 par mètre. Dans les cas exceptionnels où cette pente serait impossible ou difficile à réaliser, l'administration aura la faculté d'autoriser des pentes plus faibles avec addition de réservoirs de chasse ou autres moyens d'expulsion à établir aux frais et pour le compte des propriétaires.

Le diamètre de ces tuyaux sera fixé sur la proposition des intéressées en raison de la pente disponible et du cube à évacuer; il ne sera en aucun cas inférieur à 0m,16.

Chaque tuyau d'évacuation sera muni, avant sa sortie de la maison, d'un siphon dont la plongée ne pourra être inférieure à 0m,07, afin d'assurer l'occlusion hermétique et permanente entre la canalisation intérieure et l'égout public.

Les modèles de ces siphons et appareils seront soumis à l'administration et devront être acceptés par elle.

Chaque siphon sera muni d'une tubulure de visite avec fermeture étanche placée en amont de l'inflexion siphoïde.

Les tuyaux d'évacuation et les siphons seront en grès vernissé intérieurement.

Les joints devront être étanches et exécutés avec le plus grand soin, sans bavure ni saillie intérieure. L'emploi de la fonte pourra être autorisé dans le cas où l'administration le jugerait acceptable. Les tuyaux d'évacuation seront plongés dans le branchement particulier jusqu'à l'aplomb de l'égout public.

Police des travaux. Art. 3. Les dispositions qui précèdent et toutes celles que l'Administration jugerait utile de prescrire seront exécutées aux frais, risques et périls du propriétaire, d'après les instructions des agents du service de l'assainissement et sans qu'il puisse être mis empêchement au contrôle de ces agents, sous quelque prétexte que ce soit.

Aucune canalisation ne sera mise en service qu'après avoir été reconnue par l'inspecteur de l'assainissement ou son délégué, qui en autorisera l'usage.

Responsabilité. Art. 4. Les abonnés sont exclusivement responsables envers les tiers de tous les dommages auxquels pourrait donner lieu l'écoulement des liquides provenant de leur propriété.

Tarif. Art. 5. Le propriétaire ou son représentant acquittera à la caisse municipale une redevance annuelle de 60 francs par chute. Toutefois, lorsque les tuyaux de chute ne desserviront que des logements d'un loyer réel de 500 francs et au-dessous, il pourra être accordé une remise de 30 francs par tuyau de chute sur le chiffre de la redevance.

Payement. Art. 6. Le montant de la somme à payer sera fixé chaque semestre après constatation contradictoire du nombre des chutes existantes par l'inspecteur de l'assainissement ou son délégué, en présence du propriétaire ou de son représentant, et sera reconnu par ceux-ci, sur un état que l'ingénieur en chef de l'assainissement transmettra à la préfecture de la Seine pour être rendu exécutoire. Le prix de l'abonnement sera versé en deux termes égaux (1er janvier et 1er juillet) et d'avance.

Résiliation. A défaut de payement à l'une des deux échéances, l'écoulement sera suspendu et l'abonnement pourra être résilié.

Contravention. Art. 7. Les contraventions aux dispositions du présent arrêté seront constatées par procès-verbaux ou rapports et poursuivies par les voies de droit, sans préjudice des mesures administratives auxquelles ces contraventions pourraient donner lieu.

285. Écoulement direct des eaux vannes à l'égout. *Système diviseur.* (*Arrêté du préfet de la Seine du* 20 *novembre* 1888.)

Art. 1er. Les propriétaires des maisons en bordure sur la voie publique pourront faire écouler les eaux vannes de leurs fosses d'aisances dans les égouts de la Ville au moyen d'appareils diviseurs.

Abonnement. A cet effet, ils souscriront des abonnements qui seront approuvés, s'il y a lieu, par arrêtés préfectoraux, sur l'avis de l'ingénieur en chef de l'assainissement. Ces abonnements seront annuels et révocables à la volonté de l'administration. Ils partiront des 1er janvier et 1er juillet de chaque année.

Renonciation. Le propriétaire pourra y renoncer en prévenant le préfet de la Seine six mois à l'avance. Quelle que soit la date de l'avertissement, le prix de l'abonnement sera exigible jusqu'à son expiration.

Conditions d'abonnement. Art. 2. Les conditions à remplir pour l'abonnement sont les suivantes :

Concessions d'eau. 1° La propriété sera desservie par les eaux de la Ville ; 2° elle sera pourvue d'un branchement d'égout particulier.

Appareils diviseurs. 3° Les eaux vannes devront être séparées des solides au moyen d'appareils diviseurs d'un modèle accepté par l'administration. Les entrepreneurs chargés de la fourniture ou de l'entretien de ces appareils seront exclusivement choisis parmi les entrepreneurs de vidange en exercice à Paris.

Caveau. Les appareils diviseurs seront établis dans un caveau convenablement ventilé, et dont le sol aura été rendu imperméable et disposé en forme de cuvette.

Cabinets d'aisances. 4° Tout cabinet d'aisances devra être muni de réservoirs ou d'appareils branchés sur la canalisation d'eau permettant de fournir dans ce cabinet une quantité d'eau de 10 litres au minimum par personne et par jour.

L'eau ainsi livrée dans les cabinets d'aisances devra arriver dans les cuvettes de façon à former une chasse suffisamment vigoureuse.

Les systèmes d'appareils et leurs dispositions générales seront soumis au conseil municipal avant que leur emploi par les propriétaires soit autorisé. Ils seront examinés

par le service de l'assainissement et devront être reçus par l'administration avant leur mise en service.

Toute cuvette de cabinets d'aisances sera munie d'un appareil formant fermeture hydraulique et permanente.

Ces dispositions seront applicables aux cabinets d'aisances des ateliers, des magasins, des bureaux et en général de tous les établissements qui reçoivent une nombreuse population pendant le jour.

Eaux pluviales et ménagères. 5° Il sera placé une inflexion siphoïde formant fermeture hydraulique à l'origine de chacun des tuyaux d'eaux ménagères.

Les tuyaux de descente des eaux pluviales seront munis d'obturateurs interceptant toute communication directe avec l'atmosphère de l'égout.

Les tuyaux devront être aérés d'une manière continue.

Tuyaux de chute. — Conduites d'eaux ménagères et pluviales. 6° Les conduites d'eaux ménagères, les conduites d'eaux pluviales et les tuyaux de chute destinés aux matières et vidange ne pourront avoir un diamètre inférieur à 0m,08, ni supérieur à 0m,16.

Les chutes des cabinets d'aisances, avec leurs branchements, ne pourront être placées sous un angle supérieur à 45° avec la verticale.

Chaque tuyau de chute sera prolongé au-dessus du toit jusqu'au faîtage et librement ouvert à sa partie supérieure.

La projection des corps solides, débris de cuisine, de vaisselle, etc., dans les tuyaux de chute et dans les conduites d'eaux ménagères et pluviales, est formellement interdite.

Le tracé des tuyaux secondaires partant du pied des tuyaux de chute et des conduites d'eaux ménagères sera prolongé dans les cours et caves jusqu'au tuyau général d'évacuation.

Il en sera de même pour les conduites des eaux pluviales si le tuyau d'évacuation peut recevoir ces eaux, sauf dans le cas où le système d'évacuation des matières de vidange et des eaux ménagères ne comporterait pas la possibilité de recevoir les eaux du ciel.

Le tracé de ces tuyaux devra être formé de parties rectilignes.

A chaque changement de direction ou de pente, il sera ménagé une tubulure ou un regard de visite et d'aération facilement accessible.

Évacuation directe à l'égout. 7° Les tuyaux d'évacuation auront une pente minima de 0m,03 par mètre. Dans les cas exceptionnels où cette pente serait impossible ou difficile à réaliser, l'administration aura la faculté d'autoriser des pentes plus faibles avec addition de réservoirs de chasse ou autres moyens d'expulsion à établir aux frais et pour le compte des propriétaires.

Le diamètre de ces tuyaux sera fixé, sur la proposition des intéressés, en raison de la pente disponible et du cube à évacuer. Il ne sera dans aucun cas inférieur à 0m,16.

Chaque tuyau d'évacuation sera muni, avant la sortie de la maison, d'un siphon dont la plongée ne pourra être inférieure à 0m,07, afin d'assurer l'occlusion hermétique et permanente entre la canalisation intérieure et l'égout public.

Chaque siphon sera muni d'une tubulure de visite avec fermeture étanche placée en amont de l'inflexion siphoïde.

Les modèles de ces siphons et appareils seront soumis à l'administration et devront être acceptés par elle.

Les tuyaux d'évacuation et les siphons seront en grès, poteries et autres produits équivalents vernissés intérieurement.

Les joints devront être étanches et exécutés avec le plus grand soin sans bavure ni saillie intérieure.

L'emploi de la fonte pourra être autorisé dans le cas où le conseil municipal jugerait cette matière acceptable.

Les tuyaux d'évacuation seront prolongés dans le branchement particulier jusqu'à l'aplomb de l'égout public.

Fosses réformées. 8° Les fosses fixes rendues inutiles par suite de l'installation des appareils diviseurs seront comblées ou converties en caves.

Police des travaux. Art. 3. Les dispositions qui précèdent et toutes celles que l'administration jugerait utile de prescrire seront exécutées aux frais, risques et périls du propriétaire, d'après les instructions des agents du service d'assainissement et sans

qu'il puisse être mis empêchement au contrôle de ces agents sous quelque prétexte que ce soit.

Les canalisations et appareils ne seront mis en service qu'après avoir été reconnus par l'inspecteur de l'assainissement ou son délégué, qui en autorisera l'usage.

Interruptions d'écoulement. Art. 4. Les abonnés n'auront droit à aucune indemnité pour cause d'interruption momentanée d'écoulement d'eaux vannes à l'égout par suite de travaux exécutés par la ville de Paris, lorsque l'interruption ne se prolongera pas au delà d'un mois. Après ce terme la réduction de la redevance fixée par l'article 6 ci-après sera proportionnelle à la durée de l'interruption.

Responsabilités. Art. 5. Les abonnés seront exclusivement responsables envers les tiers de tous les dommages auxquels pourraient donner lieu soit les appareils de vidange, soit l'écoulement des liquides en provenant.

Ils ne pourront faire aucune réclamation, ni prétendre à aucune indemnité dans le cas où les eaux de l'égout public viendraient à refluer à l'intérieur de la propriété, soit par les appareils diviseurs, soit par les canalisations.

Tarif. Art. 6. Le propriétaire ou un représentant en son nom acquittera à la caisse municipale une redevance annuelle de 30 francs par tuyau de chute.

Paiement. Art. 7. Le prix de l'abonnement sera versé d'avance en deux termes égaux (1er janvier et 1er juillet).

Résiliation. A défaut de paiement à l'une des échéances, l'écoulement sera suspendu et l'abonnement résilié.

Contraventions. Art. 8. Les contraventions aux dispositions du présent arrêté seront constatées par procès-verbaux ou rapports et poursuivis par toutes voies de droit, sans préjudice des mesures administratives auxquelles ces contraventions pourraient donner lieu.

Art. 9. L'arrêté du 2 juillet 1867 est rapporté.

Art. 10. L'inspecteur général des ponts et chaussées, directeur des travaux, est chargé de l'exécution du présent arrêté, dont ampliation sera adressée en double expédition :

1° Au bureau du visa du secrétariat général pour insertion au *Recueil des actes administratifs;* 2° à la direction des finances; 3° à M. le directeur des eaux et de l'assainissement.

286. Tuyaux de prise d'eau dans les branchements d'égout.
(*Arrêté préfectoral du* 24 *avril* 1866.)

Art. 1er. Dans tous les cas où la prise d'eau, soit d'une concession d'établissement public, soit d'un abonnement privé, sera pratiquée sur une conduite publique posée sous galerie, le tuyau alimentaire devra être placé dans le branchement d'égout desservant l'immeuble. Cette mesure sera appliquée immédiatement si ce branchement existe, sinon aussitôt que l'égout particulier aura été construit.

Le tuyau devra, pour entrer dans la propriété, pénétrer dans le mur pignon du branchement ou, s'il y a impossibilité, être dévié latéralement sous le trottoir, le long de la façade de la propriété. Dans ce cas, il sera contenu dans un fourreau métallique étanche, incliné vers l'égout. Le travail sera exécuté conformément à l'article 8 du règlement susvisé, aux frais du concessionnaire ou de l'abonné, par les entrepreneurs, soit du service des eaux, soit de la compagnie, aux conditions de leur marché.

Faute de satisfaire à cette prescription dans le délai de quinzaine à compter de l'invitation qui aura été signifiée à qui de droit par les soins de l'ingénieur en chef, la prise d'eau sera détachée de la conduite publique, d'office et aux frais du concessionnaire ou abonné, et le service sera supprimé.

Art. 2. Le directeur du service municipal des travaux publics est chargé de l'exécution du présent arrêté, qui sera inséré au *Recueil des actes administratifs* et imprimé à la suite du règlement susvisé.

287. Construction des cuvettes hydrauliques dans les branchements d'égout. Pour arrêter les émanations fétides des égouts à l'entrée des branchements particuliers, on adopte habituellement, à Paris, la cuvette à siphon, qui se place sous la porte cochère, à l'entrée du tuyau qui reçoit les eaux ménagères.

Beaucoup de propriétaires croient que cette cuvette leur est imposée par l'adminis-

tration. C'est une erreur : *l'administration municipale de Paris n'adopte spécialement aucun appareil;* l'article 13 de l'ordonnance de police du 20 juillet 1838, qui prescrit l'emploi de cuvettes à siphon, ne s'applique qu'aux entrées des puisards.

Les cuvettes à siphon placées au niveau du sol, à l'entrée des tuyaux de descente, ont d'assez grands inconvénients : elles exigent un entretien et des soins de propreté minutieux, sans lesquels les matières organiques transportées par les eaux ménagères s'y accumulent, s'y putréfient, et répandent des émanations infectes qui remontent dans les habitations.

Les meilleurs appareils hydrauliques sont ceux qui sont placés au fond même de l'égout; il suffit que le tuyau de descente plonge de quelques centimètres dans une cuvette, soit en fonte, soit en ciment, établie à 20 ou 30 centimètres au-dessus du radier de l'égout, pour qu'aucune émanation n'en provienne, parce que, dans ce cas, la cuvette reste constamment remplie d'eau. Ce mode de fermeture hydraulique n'exige pas de nettoyage.

L'administration ne peut recommander aucun appareil spécial; mais les ingénieurs du service donneront, aux personnes qui voudront bien les consulter, les renseignements les plus précis, soit pour construire des cuvettes en ciment, soit pour établir des appareils en fonte.

Il est très essentiel que les tuyaux de descente ne soient pas branchés les uns sur les autres, et qu'ils descendent jusqu'à la cuvette placée dans l'égout.

288. Réseau d'égouts de Paris. Le réseau des égouts de Paris, dont la longueur dépasse 750 kilomètres, est presque entièrement de création récente. Au commencement du siècle, Paris ne possédait que 25 kilomètres d'égout : c'était l'*égout de ceinture*, construit vers 1750 sur le lit de l'ancien ruisseau de Ménilmontant et qui se jetait en Seine vers Chaillot. Ce fut vers cette galerie, large de 2 mètres et considérée alors comme un très vaste collecteur, que l'on dirigea les quelques égouts successivement construits dans les quartiers populeux de la rive droite, jusqu'au jour où sa section devint complètement insuffisante. En 1830, lorsque les travaux d'assainissement commencèrent à prendre de l'extension, il était déjà devenu impossible d'envoyer aucun affluent nouveau à l'égout de ceinture, qui débordait à la moindre averse. Les égouts construits à partir de cette époque furent donc amenés directement à la Seine, en plein Paris.

La construction de l'égout de la rue de Rivoli, qui débarrassait la Seine d'une partie des eaux sales, mais seulement jusqu'au pont de la Concorde, avait été le seul acheminement vers un état meilleur, lorsqu'en 1856 Belgrand fit adopter en principe le réseau des égouts collecteurs.

Ce réseau se compose de trois collecteurs principaux : celui de la rive droite, aboutissant à Asnières; celui de la rive gauche ou de la Bièvre, qui se jette dans le précédent à peu de distance de son débouché, après avoir passé sous la Seine au pont de l'Alma; enfin le collecteur du Nord, qui aboutissait à l'origine à Saint-Denis, mais dont les eaux sont prises maintenant, presque à la sortie de l'enceinte, par une rigole de dérivation qui les conduit à Gennevilliers. Les seuls quartiers de Paris qui déversaient directement leurs eaux en Seine sont, avec les îles de Saint-Louis et de la Cité, Auteuil et Bercy, parce que les quais de la rive droite manquent encore d'égouts, d'une part en aval du pont de l'Alma, d'autre part en amont du pont d'Austerlitz.

Débarrasser les eaux de la Seine dans la traversée de Paris d'une cause aussi grave de souillure, c'était bien; mais l'altération des eaux du fleuve à l'aval, inappréciable en grandes crues, insignifiante en régime moyen, devient très sensible en étiage; et dans cette dernière période l'altération est d'autant plus visible que les eaux d'amont arrivent plus limpides. Le mal est encore aggravé par les résidus de Saint-Denis et des usines de la plaine, et par l'obstacle que plusieurs îles de la Seine mettent au mélange immédiat des eaux des collecteurs avec le courant. Il en résulte que la rive droite, la plus peuplée, est baignée, en réalité, sur un très long parcours, par la totalité des eaux déversées, qui déposent sur ses bords les matières en suspension et les précipités divers que produit la décomposition progressive des matières organiques.

Aussi les réclamations des riverains ont-elles suivi de près l'ouverture des collecteurs; et, dès 1867, l'administration municipale dut se préoccuper de rechercher les moyens d'épurer les eaux d'égout avant de les verser à la rivière. Les procédés de filtrage furent tout naturellement les premiers essayés. Mais on reconnut promptement qu'outre les difficultés pratiques de la filtration opérée sur d'aussi grandes masses, ces procédés avaient le défaut capital de laisser dans les eaux les matières organiques solubles fermentescibles. On recourut ensuite à l'emploi d'une foule de réactifs pour opérer la précipitation chimique des substances organiques dissoutes. On n'obtint que des résultats médiocres.

Mais les procédés d'épuration par le sol, essayés en même temps que les procédés mécaniques, étaient heureusement couronnés d'un plein succès. Depuis vingt ans, l'épuration et l'utilisation agricole par répandage sur des terrains perméables et par filtration a donné dans la plaine de Gennevilliers des résultats de plus en plus satisfaisants.

289. Utilisation agricole des eaux d'égout. Les égouts de Paris charrient journellement 400000 mètres cubes d'eaux, contenant 5 millions de kilogrammes de matières azotées, qui sont perdues pour l'agriculture, et dont cependant l'action fertilisante est manifeste. Cet état de choses s'est aggravé depuis 1880, époque où le conseil municipal de Paris a supprimé les fosses fixes et décidé l'envoi à l'égout de toutes les matières (284). Les eaux de Seine, où les égouts se déversent, sont donc empoisonnées de ce fait.

Pour y remédier économiquement, l'ingénieur A. Durand-Claye a proposé d'infiltrer les terres avec les eaux d'égout.

Un premier essai fut fait à Gennevilliers sur 1000 hectares de mauvaises terres. Les eaux sont amenées à Gennevilliers par les collecteurs d'Asnières et de Saint-Ouen, et débouchent dans des conduites à ciel ouvert, séparées par des bandes de terre livrées à la culture, qui ont 1 mètre environ de largeur et de $0^m,30$ à $0^m,40$ de hauteur au-dessus des rigoles. Ces rigoles reçoivent, par de petits empalements, l'eau des canaux intermédiaires placés au-dessus du sol, dans lesquels les conduites principales la déversent par de fortes valves. L'eau est distribuée

tous les trois ou quatre jours, de façon à avoir un débit annuel de 50000 mètres cubes par hectare. Les résultats ont été encourageants : le prix des terrains à Gennevilliers a quadruplé, les terres sont devenues très fertiles. Aussi le conseil municipal, puis la Chambre des députés ont-ils adopté, en 1888, un projet consistant à envoyer les eaux d'égout de Paris dans la forêt de Saint-Germain, sur le territoire d'Achères (2000 hectares), à l'exemple de ce qui se fait déjà avec succès à Berlin, à Londres et dans d'autres villes.

MOTEURS HYDRAULIQUES

290. Pour l'établissement d'un moteur hydraulique, la chute dont on peut disposer, dite *chute disponible*, est égale à la chute totale du cours d'eau, c'est-à-dire à la différence de niveau de l'eau en aval de la première des usines d'amont et de l'eau dans le canal d'aval de l'usine à établir, diminuée de la pente nécessaire à l'écoulement de l'eau entre les deux usines et de celle nécessaire au chenal qui conduit l'eau dans le canal d'aval (171).

Le canal d'arrivée doit avoir, autant que possible, près des vannes, une section au moins égale à 10 ou 12 fois celle de la plus grande ouverture de l'orifice, afin de diminuer la dénivellation et par suite la perte de chute. Un canal de dérivation doit avoir la même profondeur que le canal principal, avec lequel il doit se raccorder par des parties arrondies; on diminue ainsi la contraction et par suite la dénivellation (172).

Le travail par éclusées, qui consiste à retenir l'eau dans des étangs pendant les interruptions de travail, afin d'augmenter momentanément la puissance des moteurs, n'est pas permis; car s'il est avantageux aux usines d'amont, il est très gênant pour celles d'aval. On ne le tolère que quand il remonte à des époques pour lesquelles il y a prescription, ou auxquelles l'usine supérieure existait seule.

A l'origine des canaux de dérivation, on établit des vannes de *prise d'eau ou de garde*, qui permettent de régler l'arrivée de l'eau dans le canal, ou même de l'interrompre. Comme un canal de prise d'eau ne doit pas servir en général à l'évacuation des crues, quoique parfois la vitesse de l'eau puisse y être augmentée notablement sans qu'on ait à redouter la dégradation des parois, on élève les murs bajoyers ou les charpentes qui les remplacent jusqu'au-dessus du niveau des plus hautes eaux, et on les réunit par une fausse vanne ou tête d'eau solide qui s'élève à la même hauteur. Si le cours d'eau est susceptible d'entraîner des corps flottants, arbres, pièces de charpente, etc., ou de rouler des rochers, il est bon de préserver les vannes de prise d'eau par une estacade formée de poteaux verticaux de $0^m,20$ à $0^m,25$, et établis obliquement de manière à rejeter ces corps entraînés vers le courant principal. Enfin, il est prudent de ménager dans les bajoyers des rainures verticales de $0^m,15$ à $0^m,20$ destinées à recevoir des poutrelles contre lesquelles on peut appuyer un batardeau en cas de réparation.

291. Règlement des eaux. Aux termes de la circulaire du 23 octobre 1851, on entend par niveau légal de la retenue la hauteur à laquelle l'usinier doit, par une manœuvre convenable de ses vannes de décharge, maintenir les eaux en temps ordinaire et les ramener autant que possible en temps de crue. La fixation de ce niveau doit être faite de manière à ne porter aucune atteinte aux droits de l'usine supérieure et à ne causer aucun dommage aux propriétés riveraines. Pour la première de ces conditions, la circulaire ne pose aucune règle. Pour la seconde, elle indique qu'à défaut d'usages locaux et de circonstances particulières, il est nécessaire de maintenir entre le niveau et la retenue habituelle et les parties les plus déprimées des terrains qui s'égouttent directement dans le bief une différence de niveau de $0^m,16$, en même temps que de protéger les terrains inférieurs au bief par une digue de $0^m,30$ au moins de hauteur.

La différence $0^m,16$ ne paraît s'appliquer qu'aux terrains de consistance moyenne cultivés en prairies, qui sont les plus fréquents. Pour les terrains de labour, l'usage, dans certains départements, est de maintenir une différence de niveau de $0^m,50$ à $0^m,66$. Dans les vallées tourbeuses, le relief du sol doit, suivant Nadault de Buffon, varier de $0^m,25$ à $0^m,50$ (*Études sur les règlements des eaux*, par M. de Lafont, *Annales des ponts et chaussées*, 1861).

Quand l'usine est établie en travers d'un cours d'eau naturel, le niveau de l'eau doit être maintenu entre de certaines limites, même en temps de crue. Pour cela, on établit près de l'usine un déversoir de superficie dont la crête se trouve à une hauteur fixée par le règlement d'eau, et indiquée sur une partie fixe des maçonneries des bâtiments voisins par une ligne qui y est creusée au ciseau ou par une pièce de fer qu'on y a scellée. Ce déversoir, construit ordinairement le long d'une des rives, avec une largeur au moins égale à la largeur moyenne de la rivière, suffit pour maintenir le niveau entre des limites convenables en temps d'étiage et d'eaux moyennes; mais il n'en est pas ainsi en temps de crue; aussi pour assurer le régime des eaux, construit-on des vannes de décharge ou pertuis de fond capables de débiter, conjointement avec le déversoir, le produit des crues.

Sur un canal de dérivation établi avec des dimensions convenables, on construit, également tout près de l'usine, un déversoir et une vanne de décharge. Le déversoir n'a alors pour objet que de laisser évacuer l'excès accidentel d'eau qui peut résulter de la diminution de la dépense ou de la cessation momentanée du travail, sans qu'on ait besoin, pour maintenir un niveau convenable dans le canal, de manœuvrer les vannes de prise d'eau, qui sont ordinairement assez éloignées de l'usine. Ce déversoir est nécessaire aussi pour assurer le travail à eau courante des usines qui peuvent se trouver en aval sur le canal de fuite; sa largeur est ordinairement égale à une fois et demie la largeur du canal à la surface de l'eau. Quant aux vannes de décharge, elles servent dans ce cas à vider le canal, ou à y laisser couler momentanément l'eau avec une vitesse suffisante pour que les vases soient entraînées, sans que le

fond soit dégradé. Le seuil de ces vannes est au niveau du fond du canal, et précédé d'un avant-radier en bonne maçonnerie.

292. Roues à aubes planes recevant l'eau en dessous, ou roues à choc. Pour que, dans une roue verticale à aubes planes recevant l'eau en dessous, il y ait équilibre dynamique, on doit avoir théoriquement, d'après Bélanger, la relation :

$$\mathcal{T}_m = \frac{1}{2}mV^2 - \frac{1}{2}m(V-v)^2 - \frac{1}{2}mv^2 - \frac{2}{1}mgh'\left(\frac{V}{v} - \frac{v}{V}\right).$$

m masse de l'eau dépensée par seconde (20);
V vitesse d'arrivée de l'eau sur la roue;
v vitesse que conserve l'eau en quittant la roue ou vitesse du centre d'impulsion des aubes;
h' épaisseur de la lame fluide à sa sortie de la roue;
$\mathcal{T}_m$ quantité de travail produite par seconde;
$\frac{1}{2}mV^2$ puissance vive que possède l'eau au moment de son choc sur la roue (29);
$\frac{1}{2}m(V-v)^2$ perte de puissance vive due au choc de l'eau sur la roue;
$\frac{1}{2}mv^2$ perte de puissance vive due à la vitesse que conserve l'eau en quittant la roue.

En négligeant, comme on l'a fait jusqu'à présent, le terme $-\frac{1}{2}mgh'\left(\frac{V}{v} - \frac{v}{V}\right)$, dû à l'élévation de niveau de l'eau en passant de la vitesse V à celle v, on a :

$$\mathcal{T}_m = \frac{1}{2}mV^2 - \frac{1}{2}m(V-v)^2 - \frac{1}{2}mv^2, \quad \text{d'où} \quad \mathcal{T}_m = mv(V-v).$$

Ce qui fait voir que pour une même valeur de V, $\mathcal{T}_m$ est le plus grand possible quand le produit $v(V-v)$ est maximum; ce qui existe quand on a $v = V - v$ ou $V = 2v$; car si l'on considère V comme étant le diamètre d'un cercle, $v(V-v)$ est égal au carré d'une perpendiculaire abaissée d'un point de la circonférence sur le diamètre qu'elle divise en deux segments v et $V-v$ (*Int.* 670); or cette perpendiculaire, et par suite son carré, a la plus grande valeur possible, quand elle passe au centre (*Int.* 549, 973, 1783), ce qui donne bien $v = V - v$. De plus, en examinant de quelle manière varie la perpendiculaire en faisant varier v et par suite $V = 2v$, on voit qu'elle ne change pas sensiblement tant que v reste compris entre $\frac{1}{3}$ et $\frac{2}{3}$ de V. Ainsi, pour ce genre de roues, l'effet maximum aura lieu quand la vitesse de la roue sera moitié de la vitesse avec laquelle l'eau vient la frapper, et cet effet maximum ne diminuera pas sensiblement tant que v restera compris entre $\frac{1}{3}$ et $\frac{2}{3}$ de V.

Remplaçant dans le second membre de la formule précédente v par

$\frac{V}{2}$, on a :

$$\mathcal{T}_m = \frac{mV^2}{4} = \frac{Ph}{2}.$$

$P = mg$ poids d'eau dépensé par seconde (23) ;

$h = \frac{V^2}{2g}$ chute effective, que l'on prend égale à la différence du niveau de l'eau en amont de la vanne et derrière la roue (133).

Cette dernière formule fait voir que l'effet utile maximum n'est que moitié du travail total dépensé.

Dans la dernière valeur de $\mathcal{T}_m$ on a fait $V^2 = 2gh$, ce qui suppose que la hauteur du niveau de l'eau dans le bief supérieur, au-dessus du centre de gravité de l'ouverture de la vanne, est égal à h, et que la vitesse de l'eau n'est pas diminuée entre la vanne et la roue (134).

Les pertes d'eau et les divers frottements, qu'on a négligés dans l'établissement des formules précédentes, font que le travail utile effectif n'est que les 0,60 environ du travail moteur théorique; ainsi l'on a seulement :

$$\mathcal{T}_m = 0{,}60\ \frac{Ph}{2} = 0{,}30\ Ph. \qquad \text{(A)}$$

Avec de bonnes dispositions de roues, on peut augmenter cet effet utile.

La théorie donne $v = \frac{1}{2}V$ pour le maximum d'effet; mais les roues construites fournissent ordinairement $v = \frac{2}{5}V$.

L'effet utile de ce genre de roues est faible; mais comme il est indépendant du diamètre de la roue, que l'on peut faire varier de 2 mètres à 8 mètres, et que de plus on peut, sans altérer sensiblement cet effet utile, faire varier la vitesse dans des limites étendues, ces roues sont convenables quand on a besoin d'une grande vitesse directe de rotation, et surtout quand on est obligé de faire varier cette vitesse dans des limites étendues.

Il convient, pour que la marche de la roue soit régulière, que sa vitesse au centre d'impulsion des aubes ne soit pas inférieure à 1 mètre.

Le jeu entre les aubes et le coursier ne peut guère être inférieur à $0^m{,}01$, et il s'élève parfois à $0^m{,}02$ et $0^m{,}03$.

Il convient d'incliner la vanne, afin de rapprocher, autant que possible, son ouverture du point d'action de l'eau sur la roue; ce qui diminue les frottements de l'eau dans le coursier, et augmente le coefficient de dépense de la vanne (147).

D'après Bélanger, on peut conclure qu'il convient de donner au fond du coursier, entre la vanne et la roue, une inclinaison de 1/12 à 1/15; de le faire concentrique à la roue sur une étendue au moins égale au double de l'intervalle de deux aubes consécutives, cette étendue étant

divisée en deux parties égales par la verticale passant par l'axe de la roue; de prolonger ensuite le fond du coursier par un plan légèrement incliné, de $1^{m},50$ à 2 mètres de longueur, se raccordant avec le canal de fuite; ce plan étant incliné de manière qu'au point où il se raccorde avec le canal de fuite, la profondeur d'eau soit égale ou un peu supérieure au double de la levée de la vanne. On incline ensuite le canal de fuite de 1/15 sur une longueur de 10 mètres, et de plus, si les localités le permettent, on l'élargit graduellement de $0^{m},50$ de chaque côté pour cette longueur de 10 mètres; il faut éviter de faire cet élargissement d'une manière brusque.

D'après Bélanger, il y a théoriquement avantage à faire plonger les aubes, quelle que soit leur vitesse, tant que leur enfoncement dans l'eau ne dépasse pas l'épaisseur convenable $0^{m},15$ à $0^{m},20$ de la veine fluide à son arrivée sur la roue, et même plus si la vitesse est très grande. La pratique a confirmé cet avantage, tant que la partie prolongée des aubes ne dépasse pas les 2/3 ou les 3/4 de l'épaisseur de la lame fluide, et elle a appris, en outre, qu'il n'y avait aucun inconvénient à faire prolonger les aubes de toute l'épaisseur de la lame. D'après cela, il y a donc lieu de tenir le fond du coursier au-dessous du niveau de l'eau en aval de la roue.

La hauteur des aubes varie entre 2 fois 1/2 et 3 fois la levée verticale de la vanne, et leur distance, mesurée sur la circonférence passant par leur centre, entre 1 fois et 1 fois 1/2 leur hauteur.

Le nombre des aubes doit être le nombre pair le plus rapproché de 6 fois le diamètre moyen de la roue, exprimé en mètres; la difficulté de placer convenablement ce nombre d'aubes, à cause de la position des bras, peut seule le faire modifier.

Le plus ordinairement le diamètre de ces roues varie de 3 à 5 mètres, et elles ont 6 bras.

D'après Deparcieux, une inclinaison de 20 à 22° des aubes sur le rayon, du côté qu'elles reçoivent l'eau, augmente un peu l'effet utile de la roue; cependant d'autres expériences de Bossut avaient confirmé le contraire, et dans la pratique il ne convient guère de les incliner que quand la roue est sujette à être noyée, parce qu'alors cette disposition permet aux aubes de sortir plus facilement de l'eau.

La chute maxima convenable à ce genre de roues est $1^{m},30$; pour des chutes plus grandes, le choc de l'eau contre la roue donne une perte de puissance vive considérable.

APPLICATION. *La dépense est 700 litres d'eau par seconde, et la chute $1^{m},06$; quel est le travail moteur que rendra la roue?*

Remplaçant P et h par leurs valeurs dans l'expression précédente (A) de $\mathcal{T}_m$, on a:

$$T_m = 0,30 \times 700 \times 1,06 = 222^{km},6.$$

Ce qui fait: $\dfrac{222,6}{75} = 2,97$ chevaux-vapeur.

Ayant: $V = \sqrt{2gh} = 4^{m},56,$

la vitesse de la roue, au centre d'impulsion des aubes, doit être de $2^m,28$.

La roue devant faire 9 tours par minute, par exemple, son rayon r, mesuré au centre d'impulsion des aubes, se déduit de l'équation :

$$2\pi r \times 9 \quad \text{ou} \quad 2 \times 3,14 \times r \times 9 = 2^m,28 \times 60,$$

d'où :

$$r = \frac{2,28 \times 60}{2 \times 3,14 \times 9} = 2^m 42.$$

293. Roues à aubes courbes recevant l'eau en dessous, dites roues à la *Poncelet* (*fig.* 67).

Pour que dans une roue à la Poncelet il y ait équilibre dynamique, on doit avoir théoriquement :

$$\mathcal{T}_m = \frac{1}{2} m\text{V}^2 - \frac{1}{2} m(\text{V} - 2v)^2.$$

m masse de l'eau dépensée par seconde (20);
V vitesse d'arrivée de l'eau sur la roue ;
v vitesse de la roue ;
$\text{V} - 2v$ vitesse absolue que conserve l'eau en quittant l'aube;
$\mathcal{T}_m$ quantité de travail produite par seconde;
$\frac{1}{2} m\text{V}^2$ puissance vive que possède l'eau à son arrivée sur la roue;
$\frac{1}{2} m(\text{V} - 2v)^2$ perte de puissance vive due à la vitesse que conserve l'eau.

$\mathcal{T}_m$ est maximum quand la perte de puissance vive $\frac{1}{2} m(\text{V} - 2v)^2$ est nulle, c'est-à-dire quand on a $\text{V} = 2v$, ce qui donne :

$$\mathcal{T}_m = \frac{1}{2} m\text{V}^2 = \text{P}h. \qquad \text{(p. 279)}$$

Formule qui fait voir que le travail utile théorique est égal au travail dépensé, et double de celui produit par les roues à aubes planes (292).

Les formules précédentes ne pourraient être vraies qu'autant que l'eau ne produirait pas de choc contre les aubes, c'est-à-dire qu'autant que toute l'eau arriverait tangentiellement à ces aubes; ce qui est impossible dans la pratique, à cause de l'épaisseur de la lame fluide, quelle que soit du reste la forme des aubes. Il y a donc toujours choc; d'où il résulte une perte de puissance vive, qui a été négligée dans les formules. Jamais non plus l'eau ne reste sans vitesse après avoir quitté la roue. On a aussi négligé les pertes d'eau, ainsi que le frottement de l'eau et celui des tourillons.

Malgré toutes ces causes de diminution de l'effet utile, l'expérience prouve qu'avec de bonnes dispositions de roues on obtient :

$\mathcal{T}_m = 0,65\ \text{P}h$ pour des chutes de $1^m,20$ et au-dessous;
$\mathcal{T}_m = 0,60\ \text{P}h$ *id.* $1\ ,30$ à $1^m,50$;
$\mathcal{T}_m = 0,55$ à $0,50\ \text{P}h$ *id.* $1\ ,80$ à $2\ ,00$.

Sauf des circonstances particulières, il convient de n'employer ces roues que pour des chutes inférieures à $1^m,50$, et elles sont surtout avantageuses pour des chutes qui ne dépassent pas 1 mètre.

D'après les expériences de Poncelet, on doit avoir dans la pratique $v = 0,55V$.

La forme de l'aube peut être une courbe quelconque, pourvu qu'elle soit continue; le plus souvent, c'est un arc de cercle. Dans tous les cas, elle doit être normale, ou à peu près, à la circonférence intérieure de la roue au point où elle la rencontre, et faire avec la circonférence extérieure un angle de 25 à 30°.

294. Hauteur des couronnes. La vitesse de la roue étant environ la moitié de celle d'arrivée de l'eau, il suffit, pour que celle-ci ne saute pas au-dessus des aubes quand la roue est en marche, que la distance entre les circonférences intérieure et extérieure de la roue soit 1/4 de la hauteur de chute, plus l'épaisseur de la lame d'eau à son arrivée sur la roue; mais, pour éviter que l'eau ne jaillisse encore dans la roue, il convient de la faire égale à 1/3 de la chute, plus l'épaisseur de la lame fluide (p. 286 et 292).

L'écartement des aubes à la circonférence extérieure de la roue varie de $0^m,25$ à $0^m,30$. Leur plus courte distance doit être moindre que la levée minimum de la vanne. Leur nombre doit être divisible par celui des bras.

La levée verticale de la vanne varie de $0^m,20$ à 0,30, et l'on peut la porter à $0^m,40$ dans le cas de fortes dépenses d'eau et de petites longueurs de roues.

L'écartement intérieur des couronnes doit être de $0^m,06$ à $0^m,10$ plus grand que la largeur de l'orifice de la vanne.

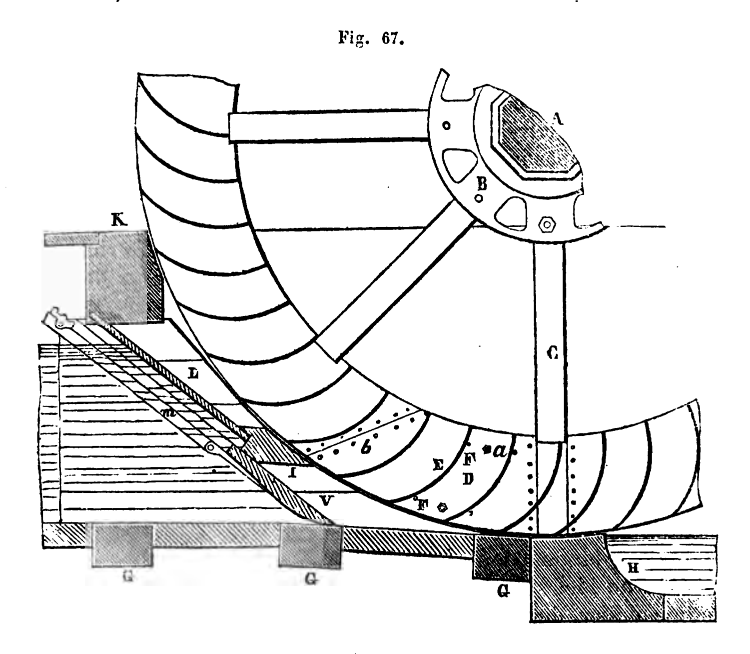
Le fond du bief supérieur est à peu près horizontal; on le raccorde avec le coursier, dont la pente varie entre 1/10 et 1/15, depuis la vanne jusqu'à son point de tangence avec la circonférence extérieure de la roue. A partir de ce point, le coursier est concentrique avec la roue jusqu'à une distance, en aval de la verticale passant par l'axe de la roue, comprise entre 1 fois et 1 fois 1/2 l'intervalle de deux aubes consécutives. Enfin, le coursier se termine par un ressaut de $0^m,30$ à $0^m,40$ de profondeur, dont le sommet doit être au niveau des eaux moyennes dans le canal de fuite. La largeur du coursier, entre la vanne et la roue, est égale à celle de l'ouverture de la vanne; la partie qui touche la roue est élargie de manière à envelopper les couronnes en laissant 1 centimètre de jeu de chaque côté. Le coursier doit conserver cette largeur jusqu'à une hauteur de $0^m,10$ au-dessus du point le plus élevé de l'ouverture de la vanne.

L'inclinaison de la vanne varie de 1 à 2 de base pour 2 de hauteur; ce qui porte, en arrondissant les côtés verticaux du pertuis, le coefficient de la dépense à 0,74 pour la première inclinaison, et à 0,80 pour la seconde (147).

Les aubes peuvent, sans que l'effet utile soit sensiblement diminué, être noyées d'une hauteur égale à l'épaisseur de la lame fluide.

La figure 67 représente, à l'échelle de 2 centimètres pour mètre, la coupe d'une ancienne roue à la Poncelet, établie à Romilly par M. Ferry. Cette roue est de la force de 50 chevaux; la chute est de $1^{m},30$, et la dépense de $4^{mc},810$ par seconde. Par suite de considérations locales, le diamètre a été fixé à $5^{m},50$, la longueur à $6^{m},04$, et, à l'exception des tourteaux qui fixent les bras à l'arbre, qui sont en fonte, on a cru devoir faire tout en bois, même les aubes.

Fig. 67.



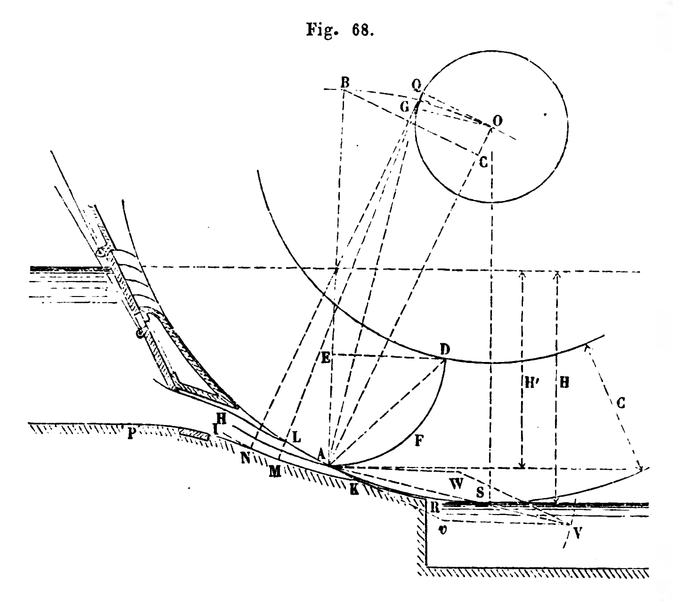
A arbre de la roue;
B tourteaux en fonte;
C bras au nombre de 8;
D couronne en bois, de $0^{m},10$ d'épaisseur et $0^{m},66$ de hauteur;
E aubes, dont les bouts entrent dans des rainures courbes faites dans les couronnes;
F boulons serrant les couronnes contre les extrémités des aubes;
a extrémités des boulons F qui relient la couronne visible sur le dessin à la couronne qui est cachée. Cette roue, dont la longueur totale est de $6^{m},04$, porte cinq couronnes qui la divisent en quelque sorte en quatre roues;
b vis à bois réunissant les madriers de $0^{m},05$ d'épaisseur composant les couronnes;
V vanne; de même que la roue, elle est divisée dans sa longueur en quatre parties qui reçoivent simultanément le même mouvement. Des cloisons formées de madriers en bois divisent également le coursier d'amont en quatre parties;
m queues des vannes; elles sont en fer, et armées à leur partie supérieure de crémaillères en fonte;
L cloison en bois formant la retenue d'eau en s'appuyant sur les poutres K et I;
G, G madriers en bois consolidant le dallage formant le sol du coursier;
H ressaut formé par une bonne pierre de taille.

Les règles qui viennent d'être exposées servaient à l'établissement de ce genre de roues, lorsque Poncelet a proposé, pour éviter le choc de

l'eau contre les aubes, de faire le coursier en développante de cercle sur une partie de sa longueur. La figure 68 représente cette modification.

Appliquons ce nouveau tracé à une roue que M. le capitaine d'artillerie Ordinaire de Lacolonge a fait exécuter à la poudrerie d'Angoulême,

Fig. 68.



d'après les indications de Poncelet. Cette roue, de $2^m,48$ de rayon, de 1 mètre de longueur entre les couronnes et de 1 mètre de hauteur de couronne mesurée suivant le rayon, est entièrement métallique; chacune des deux couronnes est composée de 8 segments en fonte; ses 8 bras sont en fonte et son arbre est en fer; elle a 40 aubes en tôle cintrées suivant un arc de cercle. On a évité toutes saillies à l'extérieur des couronnes, la roue étant sujette à marcher noyée, et on les a réduites autant que possible à l'intérieur pour diminuer le choc de l'eau.

A une distance au-dessous du niveau d'amont

$$H' = H - 1,25\,E,$$

on mène une horizontale, qui détermine, sur la circonférence extérieure de la roue, le point A où le filet moyen doit venir rencontrer cette circonférence.

H chute totale, ou différence entre les niveaux d'amont et d'aval, soit $H = 1^m,55$;
E épaisseur de la lame fluide, soit $E = 0^m,20$.

Ces valeurs de H et E, substituées dans la formule précédente, donnent $H' = 1^m,30$.

Tracé de l'aube. Poncelet ayant établi théoriquement que l'angle α formé par les tangentes à l'aube et à la roue doit s'approcher de la

valeur qui donne, R étant le rayon de la roue,

$$\cos \alpha = \frac{R - E}{R},$$

menons le rayon OA, décrivons du point A, comme centre, l'arc de cercle OB, prenons $OC = E = 0^m,20$, élevons la perpendiculaire CB à OA et traçons AB; l'angle BAO est égal à α. En effet, le triangle rectangle ABC donne bien :

$$\cos BAO = \frac{R - E}{R} = \cos \alpha.$$

Remplaçant les lettres par leurs valeurs particulières dans la formule précédente, on a:

$$\cos \alpha = \frac{2,48 - 0,20}{2,48} = 0,919\,35, \quad \text{d'où} \quad \alpha = 23^\circ 10'.$$

α diffère en général peu de 25°, valeur qu'on lui donne le plus souvent dans la pratique.

On prend le centre de courbure de l'aube sur AB. Pour l'obtenir, on trace, du centre O, une circonférence distante de la circonférence extérieure de la roue d'une quantité :

$$C = 0,6\,H = 0^m,93.$$

C'est la hauteur des couronnes; à Angoulême on a fait $C = 1^m,00$, la roue étant sujette à marcher noyée de quantités considérables.

On mène AD faisant avec AB un angle de 45°; du point D, où AD rencontre la circonférence intérieure de la roue, on abaisse une perpendiculaire DE sur AB, et E est le centre de courbure de l'aube AFD.

Le *fond du coursier*, dans le voisinage du point A, se profile suivant la développante d'un cercle qu'il s'agit de déterminer. Pour cela, on mène au point A deux droites, l'une AW tangente à l'aube, c'est-à-dire perpendiculaire à AB, et l'autre Av tangente à la roue, c'est-à-dire perpendiculaire à AO; on prend sur Av une longueur arbitraire Av représentant la vitesse de la roue, soit $Av = 1$; du point A comme centre, avec un rayon représentant la vitesse $V = \sqrt{2gH'}$ d'arrivée du filet moyen au point A, on décrit un arc de cercle; on peut supposer $V = 2v$ et prendre le rayon $AV = 2Av = 2$. Par le point v on mène une parallèle vV à AW, et joignant A au point de rencontre V de cette parallèle avec l'arc que l'on vient de tracer, AV représente en grandeur et en direction la vitesse d'arrivée du filet moyen au point A. Terminant le parallélogramme $AvVW$, AW est la vitesse relative d'arrivée de l'eau sur la roue (*Int.* 1511).

Cela fait, on mène par le point A une perpendiculaire AG à AV, et par le centre O une perpendiculaire OG à AG; OG est le rayon du cercle cherché. La développante AH de ce cercle (*Int.* 1238), passant par le point A, représente le chemin que doit suivre le filet moyen à son arrivée en A. Pour cela, on profile le fond du coursier suivant une développante IK équidistante de la première AH d'une quantité égale à la

moitié de l'épaisseur E de la lame fluide, soit de 0m,10, d'après notre hypothèse.

L étant le point où le filet supérieur rencontre la roue, on prolonge la développante de cercle au delà du point M, vers l'amont, d'une quantité MN égale à 0m,20 au moins. A partir du point N, le coursier se raccorde avec le fond du canal d'arrivée par un arc de cercle NP à grand rayon, qui a son centre sur la tangente NQ, et qui est tangent au fond du canal à la développante en N.

Le coursier est concentrique à la roue depuis le point K jusqu'au sommet R du ressaut; la distante KR se prend égale à l'écartement des aubes et même un peu plus petite.

Le sommet R du ressaut, au lieu d'être placé en aval de la verticale passant par le centre de la roue, est placé en amont à une distance SR telle que l'eau ait le temps d'agir sur l'aube, et que, cependant, elle l'ait quittée avant que celle-ci se soit élevée à une trop grande hauteur en aval du point S. On peut fixer approximativement la distance SR à 0m,30 pour les petites chutes et les roues de 1m,50 de rayon, et à 0m,40 ou 0m,45 pour les chutes de 1 mètre au moins et des rayons supérieurs à 1m,50.

295. *Tableau des résultats fournis au frein par la roue d'Angoulême, à la marche ordinaire, sans engorgement d'eau à l'aval.*

LEVÉE de vanne E.	CHUTE H.	DÉPENSE d'eau en litres.	NOMBRE de tours par minute.	TRAVAIL utile en chevaux.	RENDEMENT.	Abaissement du rendement maximum quand le nombre de tours varie entre 8 et 12.	RAPPORT DE LA VITESSE v de la roue à celle du filet moyen au point A $\frac{v}{V}$	due à la charge sur le centre de l'orifice.	due à la charge sur le sommet de l'orifice.
mèt.	mèt.	lit.		chev.					
0,05	1,560	167	6,896	1,733	0,497	»	0,351	0,395	0,399
0,10	1,545	328	8,955	4,220	0,624	»	0,475	0,524	0,538
0,15	1,555	487	10,118	6,331	0,627	1/12	0,544	0,596	0,621
0,20	1,540	632	10,453	8,700	0,671	1/9,5	0,574	0,636	0,672
0,25	1,560	787	10,399	11,102	0,678	1/11	0,579	0,634	0,681
0,30	1,550	924	9,670	12,530	0,656	1/50	0,556	0,604	0,661

Ainsi, pour les levées de vanne 0m,20 et 0m,25, qu'on regarde généralement comme les plus favorables, et pour lesquelles la roue avait été tracée, le rendement s'est élevé à 0,671 et 0,678; ce rendement est du reste peu différent pour des levées de vanne de 0m,15 et même 0m,10 à 0m,30.

Le tableau suivant contient les résultats fournis par la même roue, les trois premières lignes pour des petits engorgements peu supérieurs à la moitié de la levée de la vanne, et les trois dernières pour de grands engorgements :

LEVÉE de vanne E.	ENGORGEMENT.	CHUTE H.	DÉPENSE d'eau.	NOMBRE de tours.	TRAVAIL utile.	RENDEMENT.	RAPPORT $\frac{v}{V}$
mèt.	mèt.	mèt.	lit.		chev.		
0,15	0,11	1,45	488,2	10,000	6,988	0,741	0,537
0,20	0,12	1,44	638,6	8,955	9,072	0,740	0,488
0,25	0,13	1,438	790,7	10,657	11,383	0,752	0,593
0,25	0,33	1,237	789,4	10,000	9,424	0,724	»
0,30	0,35	1,212	930,2	10,033	11,347	0,755	»
0,50	0,57	0,990	929,3	9,804	7,700	0,621	»

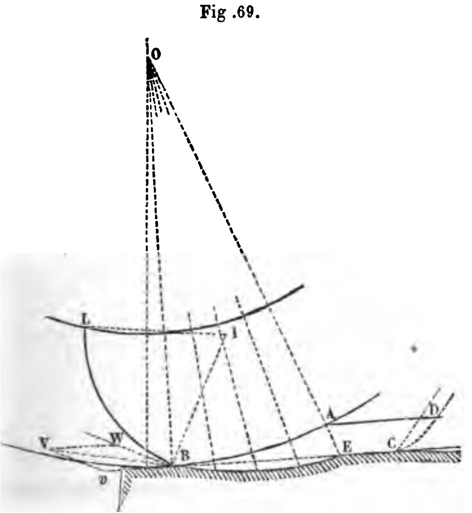
Les trois premières expériences de ce tableau montrent qu'il y a un avantage sensible à noyer la roue d'une quantité égale à la moitié de la levée de la vanne; ce que l'on peut attribuer à ce que, comme pour les roues à aubes planes, l'eau s'échappant de la roue avec une vitesse dirigée de l'amont vers l'aval, elle refoule l'eau, dégage la roue, et augmente la chute apparente. Les trois dernières expériences tendent à prouver que cet effet se fait encore sentir pour des engorgements beaucoup plus considérables, et quoique ces expériences aient été peu prolongées, des résultats qu'elles ont fournis on peut admettre qu'avec des engorgements légèrement plus forts que la lame d'eau, la roue fonctionne bien et a de forts rendements; mais qu'il convient de considérer l'engorgement de $0^m,57$ comme une limite. Quoi qu'il en soit, il convient en général d'établir le sommet du ressaut de ces roues au niveau normal de l'eau dans le canal de fuite, en ayant soin de prolonger les faces verticales du coursier assez loin au delà de la roue pour utiliser la vitesse de sortie de l'eau pour refouler l'eau d'aval. Si même les crues sont fréquentes et durables, il y a lieu d'élever le sommet du ressaut.

Il convient de déterminer le rayon de la roue et la hauteur des couronnes pour la condition qu'à une vitesse à la circonférence peu différente de 0,50 ou 0,55 de $V = \sqrt{2gH'}$, la hauteur des couronnes soit égale à la moitié du rayon, et que le rapport de la capacité offerte à l'admission de l'eau au volume maximum d'eau à dépenser soit égal à 1,5 pour le cas des cours d'eau ordinaires à faibles crues, et à 2 pour les cours d'eau exposés à de grandes crues d'aval.

Comme la roue d'Angoulême est sujette à être noyée de plus de $0^m,57$, on a disposé (*fig.* 68), au-dessus de la vanne ordinaire, une seconde vanne qui, en s'élevant, démasque des orifices garnis de courbes directrices qui amènent l'eau sans choc sur le premier élément des aubes. L'eau agit alors par son poids comme dans les roues de côté. C'est surtout cette disposition qui exige une grande hauteur de couronne. On a ainsi marché avec un engorgement de $0^m,82$ sans que la vitesse fût sensiblement inférieure à la vitesse normale; le rendement était considérablement diminué; mais comme l'eau était alors en grande abondance, on obtenait encore un travail suffisant.

296. Coursier en spirale. Pour une roue établie à la poudrerie du Ripault, Morin a modifié un peu la forme de coursier en développante, à laquelle il reproche d'élever le seuil de la vanne beaucoup trop haut dès que la hauteur d'orifice dépasse $0^m,15$ pour des roues de $2^m,80$ à $3^m,60$ de diamètre et une chute de $1^m,50$.

Fig .69.



OA étant le rayon de la roue, on mène à la circonférence extérieure une tangente BC inclinée à 1/10 environ, qui représenterait le fond du coursier dans l'ancien tracé. On mène à cette tangente, à une distance égale à l'épaisseur de la lame fluide entre la vanne et la roue, une parallèle AD. On prolonge le rayon OA, et, à partir du point E jusqu'à celui du contact B, le coursier prend la forme d'une spirale, c'est-à-dire qu'il s'approche de la circonférence extérieure de la roue de quantités égales pour des angles égaux décrits autour du centre (*Int.* 1232).

Avec cette disposition, les différents filets fluides de la veine, qui conserve à peu près une épaisseur uniforme entre la vanne et la roue, décrivent des spirales analogues, et entrent tous dans la roue sous des angles peu différents, c'est-à-dire sans choc sensible, si le premier élément de l'aube est dirigé suivant la vitesse relative d'arrivée du filet moyen, ou même du filet inférieur.

Pour tracer l'aube, au point B on mène une tangente BV à la spirale (*Int.* 1233); on prend, à une même échelle arbitraire, $BV = 1$ et, sur le prolongement de EB, $Bv = 0,55$, vitesse normale de la roue; BW, parallèle à vV, est la direction à donner au premier élément de l'aube. On mène BI perpendiculaire à BW, et d'un point I, pris sur cette perpendiculaire, traçant un arc qui fasse avec la circonférence intérieure de la couronne un angle aigu très rapproché d'un droit, cet arc détermine la forme de l'aube.

Pour des levées de vanne de $0^m,15$ et au-dessous, le profil en spirale se confond sensiblement avec celui en développante; mais, pour des levées plus fortes, il s'élève moins rapidement.

La roue du Ripault, destinée à fonctionner sous une chute de 1 mètre à $1^m,20$, a $2^m,80$ de diamètre, $0^m,80$ de longueur à l'extérieur des couronnes, $0^m,75$ de hauteur de couronne et 42 aubes.

Les expériences ont été faites avec des chutes comprises entre $1^m,20$ et $1^m,40$ quand la roue n'était pas noyée, et à la chute $0^m,90$ quand elle

était noyée de $0^m,36$. Les levées de vannes ont été de $0^m,15$, $0^m,20$, $0^m,25$ et $0^m,277$.

297. Roue non noyée. Pour la levée de vanne de $0^m,277$ on a obtenu les résultats du tableau suivant :

CHUTE au-dessus du ressaut.	EAU dépensée par seconde.	TRAVAIL absolu du moteur.	RENDEMENT.	NOMBRE de tours par minute.	RAPPORT de la capacité à l'admission au volume d'eau dépensé.
mèt.	lit.	km.			
1,282	648,4	831,3	0,534	18,7	1,744
1,272	601,4	764,5	0,574	17,6	1,776
1,232	584,4	720,0	0,606	16,7	1,735
1,312	617,8	810,0	0,614	16,1	1,584
1,192	594,4	708,5	0,609	15,8	1,612
1,272	584,4	743,4	0,640	14,8	1,543
1,182	574,5	679,1	0,616	14,6	1,550
1,232	601,1	740,5	0,594	13,2	1,341 (*a*)
1,132	571,3	646,7	0,541	11,8	1,233

(*a*) L'eau n'a commencé à jaillir dans l'intérieur de la roue que quand ce rapport a été inférieur à 1,50.

Pour les levées de vanne :

$0^m,150$ $0^m,200$ $0^m,250$ $0^m,277$,

le rendement maximum a été respectivement :

0,520 0,570 0,600 0,640,

et le nombre de tours de la roue par minute a pu varier de :

12 à 21 13 à 21 11 à 19,8 12 à 19,

sans que l'effet utile s'éloignât du maximum de plus de :

$\frac{1}{13}$ $\frac{1}{14}$ $\frac{1}{12}$ $\frac{1}{9}$.

298. Roue noyée. Pour la levée de vanne de $0^m,25$, la roue étant noyée de $0^m,242$, le rendement maximum a été de 0,60, comme quand la roue n'était pas noyée; ce rendement maximum est descendu à 0,47 ou 0,48 quand la roue a été noyée de $0^m,357$ pour la même levée de vanne $0^m,25$.

Une hauteur de couronne fixée à $0^m,75$ ou aux 3/4 de la chute, et une capacité destinée à recevoir le liquide égale au double du volume d'eau dépensé ont paru convenables pour cette roue, qui est exposée à d'assez fortes crues.

D'après Morin, le sommet du ressaut, placé au niveau ordinaire de l'eau dans le canal de fuite, doit être à $0^m,10$ ou $0^m,15$ en amont de la verticale passant par le centre de la roue; à partir de ce sommet, le coursier doit être concentrique à la roue sur une longueur de $0^m,20$ à $0^m,25$, avec un jeu de $0^m,005$ pour les roues en fonte avec coursier en

pierre, et de 0^m,01 pour les roues en bois avec coursier en bois. Par le point B de la partie circulaire (*fig.* 69), ayant mené une ligne BC inclinée au 1/10 à l'horizon, c'est à cette ligne qu'on limite la partie en spirale, en arrondissant l'arête de rencontre E. La face d'aval du ressaut est ordinairement une surface plane verticale, au lieu d'être une surface concave.

Application. Soit à établir une roue à la Poncelet pour une chute à peu près constante de 1^m,10 et une dépense de 1 200 litres par seconde.

Admettant 0,60 pour le rapport du travail moteur à l'effet total dépensé, on a par seconde :

$$\mathcal{T}_m = 0{,}60\,\mathrm{P}h = 0{,}60 \times 1\,200 \times 1{,}10 = 792^{km}.$$

La force de la roue en chevaux est :

$$\frac{792}{75} = 10{,}56 \text{ chevaux}.$$

Prenant la levée verticale de la vanne égale à 0^m,25, la charge sur l'arête supérieure de l'orifice sera, s'il s'agit d'un ancien coursier :

$$h' = 1{,}10 - 0{,}25 = 0^m{,}85.$$

Supposant la vanne inclinée à un de base pour un de hauteur, ce qui donne 0,80 pour coefficient de la dépense, l étant la dimension horizontale de l'orifice de la vanne, on a, puisque l'on peut placer, à cause de la constance du régime, le sommet du ressaut au niveau d'aval, et qu'il se trouve à peu près à la hauteur de l'arête inférieure de l'orifice de la vanne:

$$1{,}2 = 0{,}80 \times 0{,}25 \times l \times \sqrt{2 \times 9{,}8088 \times 0{,}85},$$

d'où :
$$l = \frac{1{,}2}{0{,}80 \times 0{,}25 \times 4{,}083} = 1^m{,}47.$$

Dans des expériences faites au Bouchet, le général Morin a constaté que toutes les fois que la hauteur de l'orifice et la vitesse de la roue sont telles qu'il n'y ait pas choc de la veine fluide sur les aubes, le coefficient de la dépense par le vannage incliné à 45° est d'environ 0,80, comme Poncelet l'a observé (147), avec cette différence que la charge se mesure sur le sommet de l'orifice, et non sur le seuil, comme l'a fait Poncelet, qui aurait, d'après cela, estimé les dépenses d'eau un peu trop haut. Morin a de plus remarqué que, dès qu'il y a choc et remous de l'eau à l'entrée dans la roue, le coefficient 0,80 diminue et descend parfois à 0,72 ou 0,70.

On prendra pour largeur de la roue, entre les couronnes, L = 1^m,55. La vitesse d'arrivée de l'eau sur la roue étant 4^m,083, la vitesse de la circonférence extérieure de la roue sera :

$$v = 0{,}55\mathrm{V} = 0{,}55 \times 4{,}083 = 2^m{,}25.$$

La capacité annulaire comprise entre les deux couronnes est (*Int.* 717) :

$$\left(\frac{\pi D^2}{4} - \frac{\pi (D-2C)^2}{4}\right) L. \qquad (a)$$

D diamètre de la roue;
C hauteur des couronnes suivant le rayon.

Faisant dans cette expression $D = 4C$, proportion qui convient pour les cas ordinaires, c'est-à-dire pour les chutes de $0^m,90$ à $1^m,30$, elle devient :

$$3\pi LC^2.$$

La partie de cette capacité qui passe devant la vanne en une seconde est :

$$3\pi LC^2 \times \frac{v}{\pi D} = 3\pi LC^2 \times \frac{v}{4\pi C} = 0,75LCv. \qquad (b)$$

Faisant ce volume égal à deux fois la dépense de la vanne, on a :

$$2 \times 1,2 = 0,75LCv, \quad \text{d'où} \quad C = \frac{2 \times 1,2}{0,75Lv}. \qquad (c)$$

Remplaçant les lettres par leurs valeurs relatives au cas qui nous occupe, on a :

$$C = \frac{2 \times 1,2}{0,75 \times 1,55 \times 2,25} = 0^m,917,$$

et par suite : $D = 0,917 \times 4 = 3^m,668.$

On voit que cette règle conduit à des valeurs de C plus considérables que celles qu'on a employées d'abord (p. 283); ce qui augmente la difficulté de construction de la roue; mais cela a l'avantage d'empêcher l'eau de jaillir dans la roue, non seulement pendant la marche, mais aussi lors de la mise en train.

Il peut arriver que le diamètre de la roue soit fixé par des considérations locales. Supposons, par exemple, que la condition de tenir le niveau du sol de l'usine au-dessus du niveau des plus hautes eaux oblige de faire $D = 4^m,50$.

Pour avoir la valeur de C dans ce cas, on met, en effectuant les calculs, l'expression (*a*) sous la forme :

$$\pi L(-C^2 + DC).$$

L'expression (*b*) devient :

$$\pi L(-C^2 + DC) \times \frac{v}{\pi D} \quad \text{ou} \quad (-C^2 + DC) \times \frac{Lv}{D},$$

et l'équation (*c*) :

$$(-C^2 + DC) \times \frac{Lv}{D} = 2 \times 1,2 \quad \text{ou} \quad C^2 - DC = -\frac{2 \times 1,2 \times D}{L \times v};$$

d'où :

$$C = \frac{D}{2} - \sqrt{\frac{D^2}{4} - \frac{2 \times 1,2 \times D}{L \times v}}.$$

Remplaçant les lettres par leurs valeurs, on a pour le cas qui nous occupe :

$$C = \frac{4,5}{2} - \sqrt{\frac{4,5^2}{4} - \frac{2 \times 1,2 \times 4,5}{1,55 \times 2,25}} = 0^m,85.$$

Il est nécessaire de donner aux roues à la Poncelet, surtout à celles de petites dimensions, une masse assez considérable, pour que leur inertie entretienne la régularité du mouvement; en pareil cas, il est convenable de les faire en fonte et fer.

299. Roues de côté (*fig.* 70). Ces roues reçoivent l'eau un peu au-dessous de leur axe, et elles sont le plus exactement possible enveloppées d'un coursier circulaire sur toute la partie soumise à l'action de l'eau.

L'équilibre dynamique de ces roues donne, pour une seconde, en négligeant les pertes d'eau et le frottement des tourillons:

$$\mathcal{T}_m = Ph - \frac{P}{2g}(V^2 + v^2 - 2Vv\cos\alpha) - \frac{P}{2g}v^2 - t_r.$$

P poids total d'eau dépensé ;
h chute totale ou différence du niveau de l'eau dans le bief supérieur et derrière la roue ;
V vitesse moyenne du filet moyen au moment où il rencontre la roue ;
v vitesse de la roue et de l'eau à sa sortie des aubes ;
α angle que font entre elles les deux vitesses V et v au point où le filet moyen rencontre la roue ;
$(V^2 + v^2 - 2Vv\cos\alpha) = W^2$; W étant la vitesse relative de l'eau par rapport à la roue (*Int.* 1510 et 1524), W est la perte de vitesse de l'eau. Les valeurs de V, v, α et W varient, pour tous les filets fluides et pour toutes les positions que prend l'aube par rapport aux positions de ces différents filets, depuis le point où l'auget admet chaque filet jusqu'au point où il cesse de le recevoir; mais, afin de rendre possible l'évaluation des termes de la formule précédente, on supposera, dans la pratique, la veine fluide concentrée dans son filet moyen; on prendra V pour le point où le filet moyen rencontre la circonférence extérieure de la roue; v sera la vitesse de la circonférence extérieure de la roue, et sera, pour la détermination de W, dirigée suivant la tangente à cette circonférence extérieure, au point où le filet moyen la rencontre;
$\mathcal{T}_m$ travail utile transmis par l'arbre de la roue;
Ph travail total dépensé;
$\frac{P}{2g}(V^2 + v^2 - 2Vv\cos\alpha)$ perte de travail due aux réactions et aux frottements de l'eau contre la roue;
$\frac{P}{2g}v^2$ perte de travail due à la vitesse que conserve l'eau;
t_r perte de travail due au frottement de l'eau contre le coursier, et que l'on peut évaluer par la formule de Prony $RI = av + bv^2$, en considérant, dans ce cas, v comme étant sensiblement la vitesse du fond et non la vitesse moyenne, ou à l'aide de la formule de Darcy (171). Quand les roues marchent avec une faible vitesse, $1^m,30$ et au-dessous, on peut négliger t_r .

La valeur de $\mathcal{T}_m$ peut être mise sous la forme :

$$\mathcal{T}_m = Ph - \frac{PV^2}{2g} + \frac{Pv}{g}(V\cos\alpha - v) - t_r.$$

Ce qui fait voir que, pour une même valeur de Ph, $\mathcal{T}_m$ est d'autant plus grand que la vitesse V est plus petite. C'est afin de rendre V aussi petit que possible qu'on fait arriver l'eau sur la roue par une vanne en déversoir. Cette dernière formule fait voir aussi que $\mathcal{T}_m$ est d'autant plus grand que le terme $\frac{Pv}{g}(V\cos\alpha - v)$ est plus grand; ce qui a lieu, pour des valeurs déterminées de V et v, quand cos α est maximum, c'est-à-dire égal à l'unité, et que par conséquent $\alpha = 0°$; c'est ce qu'on obtient pour les roues recevant l'eau tout à fait en dessous (292 et 293), ou ce qui aurait lieu dans une roue de côté si l'on pouvait faire arriver l'eau tangentiellement à la roue. Les valeurs de V et de α étant déterminées, le terme $\frac{Pv}{g}(V\cos\alpha - v)$ est maximum quand on a $v = \frac{V\cos\alpha}{2}$ (mêmes considérations que celles qui donnent $v = \frac{V}{2}$ au n° 292, page 279).

Dans la pratique, l'effet utile de ces roues est les 0,70 du travail total Ph dépensé quand les chutes approchent de $2^m,50$, et il n'est que les 0,50 de Ph pour les chutes de $1^m,20$; de sorte qu'on peut considérer les 0,60 de Ph comme étant l'effet utile moyen produit par ce genre de roues; mais, par des dispositions favorables, cet effet utile peut être augmenté.

Les considérations exposées plus haut conduisent à donner à la roue une vitesse $v = \frac{V\cos\alpha}{2}$. Ordinairement on a dans la pratique $v = 0,45V$.

La vitesse convenable à ces roues est de $1^m,30$ par seconde; elle ne doit être ni inférieure à 1 mètre ni supérieure à 2.

L'abaissement de la vanne au-dessous du niveau de l'eau dans le bief supérieur doit être assez fort, de $0^m,20$ à $0^m,25$.

Avec ces couvertures, la perte d'eau entre les aubes et le coursier, qui dépend de la largeur de la roue, est faible relativement au débit total de la roue, et le choc de l'eau contre les aubes n'est pas considérable (106).

Quand, par suite des sécheresses, la dépense d'eau diminue considérablement, il vaut mieux verser toute l'eau dans un seul compartiment de la roue en n'abaissant qu'une partie de la vanne, disposée à cet effet, que de la verser sur toute la roue en abaissant faiblement toute la vanne.

L'arête supérieure du col de cygne doit être placée à un niveau tel que pendant les plus basses eaux toute l'eau que doit débiter la roue puisse passer par-dessus. La vanne doit être telle que, fermée, elle s'élève de $0^m,10$ à $0^m,12$ au-dessus du niveau de l'eau et descende de la même quantité au-dessous de la crête du col de cygne.

La direction de la vanne se prend perpendiculaire au rayon de la roue mené un peu au-dessus du filet moyen du déversoir, lequel se

trouve aux 3/5 environ de la profondeur de l'orifice. La vanne verse ainsi l'eau le plus près possible de la roue, sans qu'elle puisse, dans aucune position, être rencontrée par les aubes.

Ordinairement, les aubes sont planes et dirigées suivant le rayon; mais il convient, afin de diminuer le choc de l'eau, de diriger leur premier élément suivant la direction de la vitesse W, et de les faire courbes comme les roues à la Poncelet. C'est ce que l'on fait quand elles sont en tôle; mais quand elles sont en bois, on les compose de deux parties planes, l'une dirigée suivant la direction de W et égale à peu près aux 2/3 de la profondeur de l'auget; l'autre inclinée à 45° sur le rayon, et raccordant la première avec la fonçure de la roue.

Les aubes sont en planches de chêne, et plus souvent d'orme, de $0^m,025$ d'épaisseur, lavées à la scie seulement, à l'exception du bord extérieur, que l'on dresse et fait un peu en biseau, afin de laisser le moins de jeu possible entre les aubes et le coursier. Ce jeu ne doit pas dépasser 2 à 3 millimètres.

Le centre de la roue doit toujours être placé au-dessus du niveau de l'eau dans le bief supérieur, et, s'il est possible, à $0^m,50$ au-dessus de ce niveau. Avec cette précaution, la partie extérieure de l'aube peut être dirigée suivant le rayon de la roue; ce qui facilite la construction.

La capacité de l'aubage doit être à moitié remplie par l'eau, et ne doit jamais l'être à plus des deux tiers, quand le volume à débiter est constant. Dans tous les cas, cette capacité doit être suffisante pour débiter les plus grandes eaux.

On fait la longueur des aubes égale à la largeur de la vanne, et l'on ménage dans la fonçure de la roue de petits espaces libres pour le dégagement et l'entrée de l'air quand l'eau entre dans l'aubage ou qu'elle en sort.

L'espacement des aubes peut varier de $0^m,33$ à $0^m,40$.

Il convient, d'après Bélanger, pour utiliser le mieux possible la chute, de faire plonger les aubes dans l'eau d'aval de toute l'épaisseur de la lame admise entre elles; de supprimer le ressaut brusque qu'on était dans l'habitude de faire; mais de prolonger le fond du coursier circulaire par un plan incliné à 1/12 environ, jusqu'à une distance de 3 ou 4 mètres de l'aplomb de la roue. Ce plan incliné conserve à l'eau la vitesse de la roue jusqu'à ce qu'elle quitte celle-ci; et, en vertu de cette vitesse acquise, l'eau vient même refouler celle d'aval de manière à en débarrasser la roue, qui peut alors plonger, quand elle est au repos, d'une épaisseur supérieure à celle de la lame admise entre les aubes. Les joues latérales du coursier se prolongent en aval par des plans verticaux qui s'étendent jusqu'à l'extrémité du plan incliné, et on les élève à un niveau supérieur à celui des plus grandes eaux d'aval qui permet encore de marcher.

Les expériences suivantes, faites par le général Morin, sur une roue de la poudrerie du Bouchet, confirment les avantages des dispositions conseillées par Bélanger. Cette roue a 4 mètres de diamètre, le plan incliné à 1/2 se prolonge jusqu'à $3^m,50$ environ en aval de la roue, et

la capacité de l'auget est environ de $0^{mc},228$. Morin, en abaissant la vanne à différentes hauteurs, de manière à faire varier les dépenses d'eau et les vitesses, a observé à quelle distance horizontale en aval de l'axe de la roue se produisait le remous; dans tous ces cas, l'eau entrait très bien dans la roue.

ABAISSEMENT de la vanne.	VITESSE de la circonférence extérieure de la roue.	HAUTEUR dont la roue est noyée au repos.	ÉPAISSEUR de la lame d'eau dans l'auget du bas.	DISTANCE horizontale à laquelle se forme le remous.	RAPPORT du volume d'eau admis à la capacité des augets.
m. 0,20	m. 2,235	m. 0,35	m. 0,12	m. plus de 2,00	$\frac{1}{3,44}$
0,22	1,860	*id.*	0,12	1,45	$\frac{1}{3,47}$
0,24	2,140	*id.*	0,11	2,00	$\frac{1}{3,5}$
0,31	3,350	*id.*	0,11	2,50	$\frac{1}{3,73}$

Le diamètre de ces roues ne peut guère avoir moins de 4 mètres.

Les roues de 4 mètres peuvent n'avoir que six bras par couronne; celles de 5 à 7 mètres en ont huit.

Les chutes auxquelles on peut appliquer ce genre de roues avec avantagene peuvent être supérieures à $2^{m},50$ ni inférieures à $1^{m},20$.

La figure 70 représente, à l'échelle de 2 centimètres par mètre, la coupe verticale, perpendiculaire à l'axe d'une roue de côté. La chute est de $2^{m},475$, et la dépense de 1 200 litres par seconde. (Extrait de la publication industrielle de M. Armengaud.)

A arbre de la roue;
B tourteaux en fonte servant à fixer les bras à l'arbre;
C bras boulonnés sur les tourteaux et assemblés à tenons et mortaises dans les couronnes;
D couronnes en bois de chêne formées de plusieurs segments assemblés entre eux par des languettes et des équerres en fer;
E coyaux ou bracons en chêne ajustés dans les couronnes et retenus par des clefs en bois fortement serrées;
F aubes en bois d'orme ordinairement, ou de chêne; elles sont boulonnées sur les coyaux;
G contre-aubes cylindriques clouées sur la circonférence extérieure des couronnes;
H contre-aubes planes inclinées s'appuyant sur les aubes et les contre-aubes et clouées sur des tasseaux *h*;
I coursier en pierre de taille, ou en briques, ou en bois de chêne; il s'élève latéralement sur toute la partie soumise à l'action de l'eau; au-dessus de cette limite, il est surmonté d'un côté par le mur de l'usine, appelé mur de *tampanne*, et de l'autre par un mur qui supporte le palier de la roue, et qu'on appelle mur d'*éperon*;
k plaque de fonte, appelée *col de cygne*, formant le sommet du coursier et destinée à rapprocher le plus possible la vanne de la roue;
L vanne plongeante en bois de chêne;

M crémaillère servant à manœuvrer la vanne;

m pignon s'engrenant avec la crémaillère M;

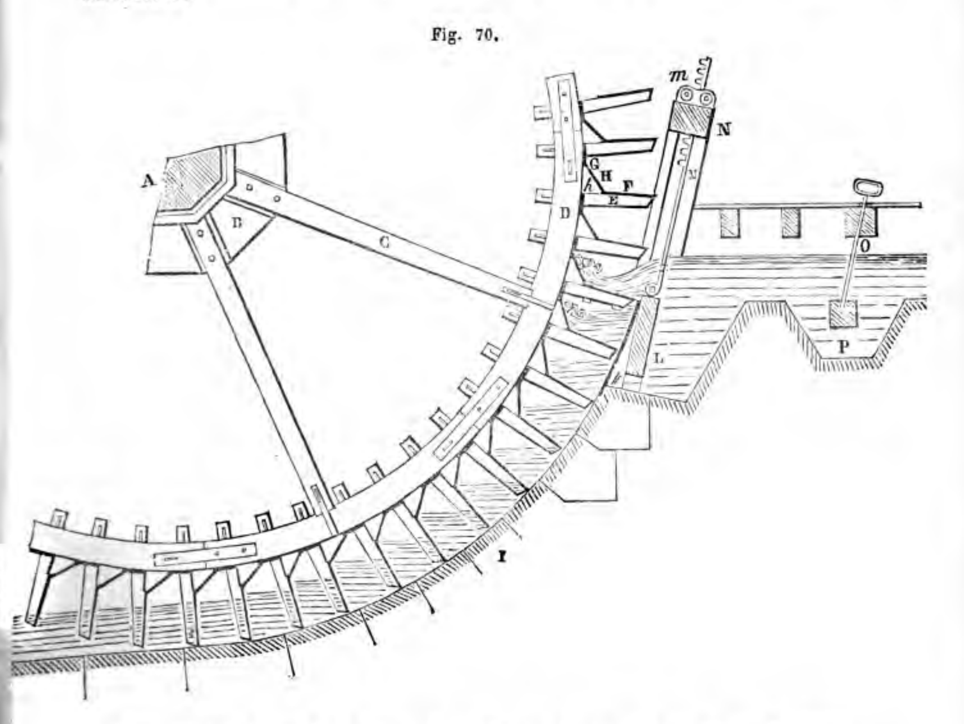
N chapeau en bois supportant toute la transmission de mouvement de la vanne; il est assemblé à ses extrémités sur deux poteaux en bois portant des rainures dans lesquelles glisse la vanne. Les parties frottantes de la vanne et de ces rainures sont garnies de bandes de fer plates, afin de diminuer le frottement;

O barreaux en fer méplat de $0^m,06$ de large sur $0^m,007$ d'épaisseur, espacés de $0^m,08$ à $0^m,09$, de manière à former une grille en forme d'éperon qui règne sur toute la largeur du canal. Cette grille est destinée à arrêter les corps flottants qui pourraient détériorer la roue. Les barreaux O portent un anneau à leur partie supérieure, afin qu'on puisse les retirer facilement quand on veut enlever les immondices;

P espace où s'accumulent les corps lourds, qui sans cela viendraient s'amonceler derrière la vanne plongeante et empêcher sa manœuvre. Malgré cette précaution, il faut encore laisser derrière cette vanne un espace libre, dont les dimensions permettent un nettoyage facile.

Dans le mur d'éperon, à l'extrémité de la fosse P, se trouve une vanne dont la crête règle le niveau supérieur des eaux, et qui descend jusqu'au fond de cette fosse, de sorte qu'en la lavant, après avoir fermé la vanne plongeante L, les eaux entraînent les immondices accumulés dans la fosse P. C'est à cet instant qu'il convient d'enlever les barreaux O.

Fig. 70.

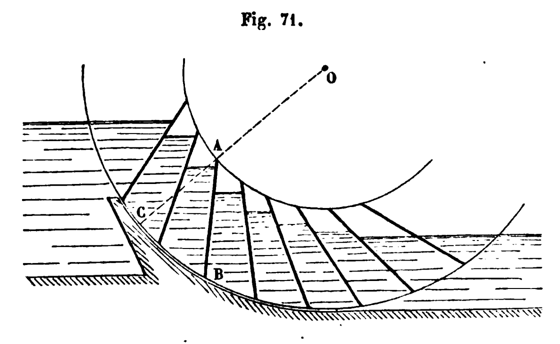


On construit aussi des roues de côté dont la vanne est disposée avec charge sur le sommet; mais on ne doit employer cette disposition que quand la vitesse v de la roue est ou peut devenir trop grande pour que l'on puisse obtenir une vitesse V convenable au moyen d'un déversoir.

Il peut arriver aussi que le niveau de l'eau dans le bief supérieur soit trop variable, ou que le fond du lit soit trop mobile pour qu'on puisse établir une vanne plongeante. Ces roues mixtes rendent un effet utile d'autant moindre que la vanne est placée plus bas par rapport à la chute totale; cet effet est les 0,40 environ du travail total dépensé pour des vitesses de roue approchant de 3 mètres; si, au contraire, la vitesse de la roue n'est que de $1^{m},50$, ce qui permet de baisser un peu moins la vanne, l'effet utile peut atteindre les 0,50 du travail total dépensé.

300. Roue Sagebien. Cette roue de côté, du nom de son inventeur, ingénieur civil à Amiens, peut être considérée comme le type des roues lentes, et de plus elle constitue un compteur d'une certaine exactitude.

Fig. 71.



M. Sagebien, pour diminuer autant que possible les pertes de travail dues aux mouvements tumultueux qui se manifestent dans l'eau à son arrivée sur une roue ou en la quittant, donne à sa roue une très faible vitesse, égale à celle avec laquelle l'eau du canal d'amont vient se placer sur les aubes. L'eau se maintient ainsi à un niveau constant dans ce canal et dans la roue, et se trouve dans un état d'immobilité apparente.

L'eau est distribuée par une vanne plongeante inclinée, aussi rapprochée que possible de la roue, et se mouvant dans un bâti en fonte dont la partie inférieure est formée par un col de cygne. Cette vanne permet à l'eau d'arriver sur les aubes par une section très grande, dont le point inférieur peut même se trouver au-dessous du niveau de l'eau dans le bief d'aval.

Les aubes sont très rapprochées l'une de l'autre, parfaitement emboîtées par le coursier ($0^{m},003$ de jeu environ), et inclinées de manière que celle qui reçoit l'eau à la surface du canal fasse avec cette surface un angle d'à peu près 45 degrés. Il résulte de cette inclinaison que la roue ayant à la circonférence une vitesse à peu près égale à celle d'arrivée de l'eau, celle-ci conserve son niveau sur l'aube qu'elle baigne, à mesure que cette aube s'enfonce. Par suite, il n'y a ni déversement ni choc de l'eau sur l'aube.

Non seulement le dénivellement est nul quand la vitesse de la roue est égale à celle d'arrivée de l'eau, mais il reste très faible si la vitesse de la roue devient supérieure à celle de l'eau.

L'eau, contenue dans chaque auget formé par deux aubes consécutives, descend de son point de puisage au point bas de la roue sans perte sen-

sible et sans secousse, en changeant seulement progressivement un peu de forme dans son ensemble.

Examinant comment l'eau sort de cette roue, on voit que lorsqu'une aube commence à se vider dans le fond, elle abandonne très peu d'eau, et qu'à mesure qu'elle s'élève, elle abandonne une quantité d'eau croissant suivant une progression déterminée par l'augmentation de la projection verticale de l'intervalle existant entre les extrémités de deux aubes successives. Il résulte de là que l'eau sort des aubes avec plus de vitesse vers la surface que vers le fond du canal, mode de sortie qui correspond à la loi du mouvement de l'eau dans les canaux.

L'inclinaison donnée aux aubes, qui semblerait devoir relever l'eau à la sortie, offre, au contraire, ce résultat favorable de déposer l'eau en aval par couches ayant déjà leur direction dans le sens du mouvement qu'elles doivent prendre dans le canal de fuite; tandis que dans les roues ordinaires, l'eau descendant verticalement, va amortir sa vitesse contre le fond du canal en produisant des bouillonnements et des remous qu'on ne remarque pas dans la roue Sagebien.

La roue est noyée en aval de toute la profondeur d'eau contenue entre les aubes, c'est-à-dire de presque toute la hauteur des aubes. Cela a pour résultat que l'eau sort de chaque auget par couches successives et sans ressaut, depuis le point bas de la roue jusqu'au niveau du bief d'aval, au lieu de le faire d'une manière brusque quand l'aube abandonne le coursier sous la verticale passant par le centre de la roue, comme cela aurait nécessairement lieu si la roue n'était pas noyée.

Les avantages pratiques de cette roue sont, en première ligne, son rendement considérable, qui est, d'après des expériences citées par l'inventeur, de 80 à 93 p. 100. Ce rendement n'est pas limité à un minimum de chute, comme cela a lieu pour les autres systèmes de roues; il se produit sur des petites chutes, de $0^m,30$ par exemple, aussi bien que sur des chutes de plusieurs mètres.

En second lieu, cette roue est susceptible de recevoir un volume d'eau considérable sans exiger une longueur qui augmente sensiblement le poids et le prix d'établissement de l'appareil, ainsi que les pertes d'eau entre la roue et le coursier. Elle peut, en effet, dépenser en une seconde jusqu'à 1 500 litres d'eau par mètre de longueur; ce qui est avantageux quand on dispose de grands volumes d'eau, qui n'avaient été utilisés jusqu'à présent que par les turbines, et cela avec un effet utile bien moindre.

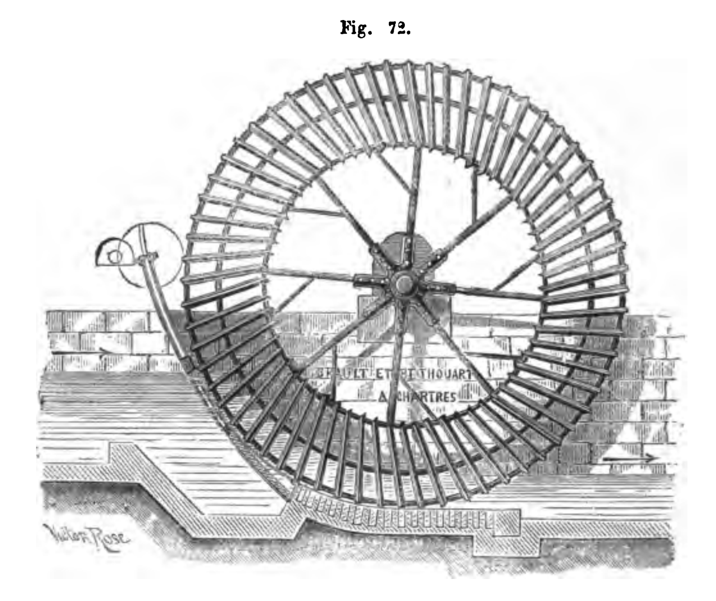
Une roue Sagebien, décrite dans le *Traité des moteurs hydrauliques*, d'Armengaud, est établie d'après les détails suivants :

Diamètre extérieur de la roue	$8^m,00$
Nombre d'aubes	80
Longueur des aubes, mesurée suivant le rayon de la roue	1 ,50
Ouverture verticale de la vanne	0 ,90
Hauteur de l'axe de la roue au-dessus du niveau de l'eau dans le bief d'amont	1 ,60
Chute	1 ,20
Noyage	1 ,20

Pour une roue de 8 mètres de diamètre et 6 mètres de longueur, une chute de 1 mètre, un noyage de $1^m,50$ et une dépense de 6600 litres par seconde, selon que la vitesse à la circonférence extérieure a été de $0^m,80$, $0^m,72$ et $0^m,60$, le rendement a été respectivement 78 à 79, 82 et 86 p. 100.

La figure 72 est le modèle des roues du système Sagebien établies, par MM. Bethouart et Brault, de Chartres (Eure-et-Loir). Une de ces roues

Fig. 72.



que ces habiles constructeurs ont établie à Vienne (Isère), pour la manufacture de draps de M. Crozel, a les dimensions suivantes :

Diamètre	$8^m,50$
Largeur	3 ,60
Nombre d'aubes	60
Longueur des aubes, mesurée suivant le rayon de la roue	1 ,75
Longueur des aubes, mesurée suivant leur inclinaison	1 ,85
Nombre de bras par chaque croisillon	10
Nombre de croisillons en fonte	4
Nombre de cintres en fer par chaque croisillon	3

Des expériences faites sur cette roue ont donné les résultats suivants :

Les aubes plongent de	$1^m,10$
Prise d'eau ou ouverture verticale de la vanne	1 ,10
Nombre de tours par minute	$1^t,61$
Dépense en litres par seconde	2104^l
Chute	$2^m,30$
Travail dépensé par seconde	$2104 \times 2,3 = 4839^{km}$
Travail effectif produit par seconde	4069
Rendement (sur le 2e arbre de transmission)	0 ,84

301. Roue Mary. La machine à vapeur de Chaillot élevait l'eau dans des bassins étagés à des niveaux différents. Mary, inspecteur général des ponts et chaussées, utilisa la chute de l'eau d'un des bassins dans l'autre pour faire mouvoir une roue hydraulique qui élevait, à l'aide de pompes, une portion de l'eau dans un petit réservoir placé à un niveau convenable pour alimenter les quartiers élevés de Chaillot et du Roule.

La roue Mary est une roue de côté, mais d'une construction particulière. Celle dont il est question était formée de six aubes à peu près circulaires, de 0^m,30 de diamètre, adaptées au pourtour d'un cylindre en fonte de 0^m,11 de longueur et 1^m,20 de rayon, formé par une couronne, et deux disques annulaires plans de 0^m,30 de largeur, perpendiculaires à l'axe et auxquels étaient assujettis les six bras à fortes nervures de la roue. Pour séparer les eaux d'amont de celles d'aval, deux plaques en fonte, noyées en partie dans la maçonnerie, venaient s'appuyer sur les disques de la couronne et formaient, dans leur partie inférieure, les lèvres d'un coursier annulaire en ciment de Vassy, calibré avec les aubes elles-mêmes, qui s'y emboîtaient ainsi très exactement. Ce coursier doit se prolonger au delà du plan vertical contenant l'axe de la roue sur une longueur égale à la moitié de l'intervalle des aubes, et se terminer au niveau des eaux d'aval; du côté d'amont, il s'évase en entonnoir pour faciliter l'entrée de l'eau, qui en couvre ainsi l'orifice, et y pénètre comme elle le ferait dans une conduite placée au fond d'un réservoir. Il résulte de cette disposition que l'eau de la retenue agit sur les palettes comme elle agirait sur un piston.

La roue ne perd à peu près rien de son effet utile quand l'eau s'élève en amont jusqu'au point de surmonter le cylindre sur lequel sont fixées les aubes.

La vitesse de la roue ne doit pas excéder 1^m,30 par seconde.

Mary a fait construire une roue semblable à la prise d'eau de la Villette, pour refouler l'eau à Montmartre. Il y avait six palettes portées par un cylindre de 0^m,57 de longueur et 1 mètre de rayon ; elles étaient rectangulaires, arrondies aux angles, et avaient 1^m,80, sur 0^m,75 suivant le rayon; elles étaient formées d'une forte plaque de tôle sous laquelle était fixé un fort madrier en bois dont la forme imitait jusqu'à un certain point celle de la proue d'un bateau. Malgré cette précaution, les aubes faisaient tellement jaillir l'eau en y pénétrant, que le rendement en était considérablement diminué.

Cette roue, qu'il ne peut être convenable d'employer que quand la variation de niveau est considérable, n'est applicable qu'à un débit d'eau constant. Du reste, malgré les perfectionnements dont elle est susceptible, son prix élevé et sa difficulté d'exécution ne lui permettent guère de devenir un moteur applicable à l'industrie. Un avantage de cette roue, c'est qu'elle est un compteur assez exact.

302. Roues à augets (*fig.* 76). L'équilibre dynamique de ces roues a la même expression que pour les roues de côté (299). Ainsi, on a pour une seconde, en négligeant les pertes d'eau, le frottement contre le

coursier, quand il y en a un, et le frottement de l'axe de la roue :

$$\mathcal{T}_m = Ph - \frac{P}{2g}(V^2 + v^2 - 2Vv\cos\alpha) - \frac{P}{2g}v^2.$$

Les lettres ont les mêmes significations qu'au n° 299.

La formule précédente peut être mise sous la forme :

$$\mathcal{T}_m = Ph - \frac{PV^2}{2g} + \frac{Pv}{g}(V\cos\alpha - v);$$

d'où l'on conclut, comme pour les roues de côté, que l'effet utile $\mathcal{T}_m$ augmente à mesure que $\frac{PV^2}{2g}$ diminue et que le terme $\frac{Pv}{g}(V\cos\alpha - v)$ augmente ; or, pour un même poids d'eau P, $\frac{PV^2}{2g}$ dépendant de la vitesse V, il faudra par conséquent rendre cette vitesse aussi petite que possible. Le terme $\frac{Pv}{g}(V\cos\alpha - v)$ sera maximum quand, pour des valeurs déterminées de V et de v, α sera nul ; cet angle est toujours très faible pour les roues recevant l'eau près du sommet. On voit aussi que, pour des valeurs déterminées de V et de α, le terme précédent sera maximum quand on aura $v = \frac{V\cos\alpha}{2}$; d'où, en supposant $\cos\alpha = 1$, $v = \frac{V}{2}$. Dans la pratique, la valeur de v peut varier des 0,30 aux 0,80 de V, sans que l'effet utile soit sensiblement altéré ; cependant, pour les petites roues, il convient de tenir v entre les 0,40 et les 0,60 de V. Cette propriété des roues à augets, de permettre une aussi grande variation de vitesse de rotation, les rend précieuses dans un grand nombre de circonstances, comme, par exemple, pour les marteaux, où non seulement la vitesse est grande, mais aussi doit varier à chaque instant entre des limites très éloignées.

La vitesse des roues à augets ne doit pas être inférieure à 1 mètre pour que leur marche soit régulière, et elle peut atteindre 2 mètres pour les petites roues, et $2^m,50$ pour les grandes, sans que l'effet utile soit sensiblement altéré. Pour les roues de marteaux, dont l'arbre porte la bague à cames, la vitesse atteint quelquefois 4 à 5 mètres, quoique leur diamètre ne soit que de 3 à 4 mètres ; mais alors l'effet utile est diminué.

Les augets commençant à verser leur eau avant d'être arrivés au point le plus bas de la roue, il en résulte une perte d'effet utile d'autant plus forte que la hauteur de versement et la quantité d'eau versée sont plus grandes, et que par conséquent le diamètre et la vitesse de la roue sont plus grands. C'est afin d'éviter ce versement qu'on enveloppe quelquefois la roue d'un coursier, depuis le point où commence le versement jusqu'à celui où les augets sortent de l'eau.

Versement des augets. L'action combinée de la pesanteur et de la force centrifuge fait que la surface du liquide contenue dans l'auget prend une forme cylindrique à section circulaire, dont le centre O est, d'après Poncelet, situé sur la verticale passant par l'axe de la roue, à une distance au-dessus de cet axe égale à

$$\frac{g}{\omega^2}.$$

$g = 9^m,8088$ accélération de vitesse due à la pesanteur ;
ω vitesse angulaire (100) ; elle est égale au quotient de la vitesse d'un point quelconque de la roue par la distance de ce point à l'axe ; d'où l'on voit que la distance $\frac{g}{\omega^2}$ est indépendante du rayon de la roue.

Le centre commun O des courbes affectées par la surface du liquide contenu dans un auget étant connu, ainsi que la quantité d'eau contenue dans l'auget, il sera facile, à l'aide d'une épure, de déterminer le point où l'auget commencera à verser, puisqu'en ce point il devra encore contenir tout le fluide, et que la surface de celui-ci, qui a pour centre le point O, devra passer par l'arête extérieure de l'auget. A partir du point où l'auget commence à verser, la surface de l'eau passant toujours par l'arête extérieure de l'auget, il est facile de déterminer la quantité de liquide contenue dans l'auget en une position quelconque, et par suite la quantité de fluide perdue dans le passage de l'auget d'une position à une autre. Divisant alors la hauteur verticale h', du point où commence le versement au-dessus du niveau de l'eau derrière la roue, en un certain nombre pair de parties égales, 6 par exemple, et déterminant les quantités de liquide $q_0, q_1, q_2, q_3. q_4, q_5, q_6$, perdues par l'auget quand il arrive successivement au point ou commence le versement, aux 1er, 2e, 3e, 4e, 5e points de division de h' et au bas de h', la perte de travail t_p due au versement de liquide est, en appliquant la formule de Thomas Simpson (*Int.* 1268 et 1804) :

$$t_p = \frac{h'}{6 \times 3} [q_0 + q_6 + 4(q_1 + q_3 + q_5) + 2(q_2 + q_4)].$$

Il est à remarquer qu'on aura $q_0 = 0$, puisque q_0 correspond au point où commence le versement; q_6, q_5 et souvent q_4 seront égaux chacun au poids total de l'eau que reçoit l'auget en passant devant la vanne, l'auget étant vide quand il arrive aux points de division de h' correspondant à ces quantités.

Supposant qu'il passe n augets par seconde devant la vanne, la perte de travail par seconde due au versement sera nt_p.

Effet utile. Une roue à augets bien disposée, enveloppée d'un coursier et marchant à une faible vitesse, rend quelquefois un effet utile $\mathcal{T}_m = 0{,}80\,Ph$; mais avec les dispositions ordinairement usitées dans la pratique, la vitesse étant comprise entre 1 mètre et 2 mètres, et les augets remplis à moitié, cet effet utile est généralement compris entre 0,70 et

0,75 Ph, que les roues soient libres ou à coursier. Pour des vitesses plus grandes et des augets remplis au delà des 2/3 de leur capacité, cet effet descend jusqu'à 0,60 Ph, surtout pour les roues sans coursier. Enfin, pour les petites roues de marteau marchant à grande vitesse, cet effet n'est quelquefois que de 0,37 Ph ; ce faible rendement d'effet utile est dû à ce que l'eau tombant avec impétuosité sur la roue, qui marche très vite, elle rejaillit hors de la roue, ou est emportée hors des augets par la force centrifuge ; c'est surtout dans ce cas que le coursier produit une augmentation sensible d'effet utile.

Augets. La capacité des augets est les 3/4 de celle de la couronne, et comme ils ne doivent être que moitié pleins, l'eau n'occupe donc que les 3/8 de la couronne.

On a : $$Q = kelV, \quad \text{d'où} \quad l = \frac{Q}{keV}.$$

Q volume d'eau dépensé par seconde ;
k coefficient de la dépense (139) ;
e levée de la vanne ;
l longueur de l'ouverture de la vanne ;
V vitesse d'écoulement de l'eau.

Pour que l'air se dégage facilement des augets, on fait leur longueur c'est-à-dire la distance des couronnes, égale à l augmentée de $0^m,10$ ou $0^m,12$; on doit avoir alors (pages 292 et 293) :

$$Q = \frac{3}{8}\left(\frac{\pi D^2}{4} - \frac{\pi (D - 2C)^2}{4}\right) L \times \frac{v}{\pi D}, \quad \text{d'où} \quad C = \frac{D}{2} - \sqrt{\frac{D^2}{4} - \frac{8}{3}\frac{DQ}{Lv}}.$$

D diamètre extérieur de la roue ;
C hauteur des augets, mesurée suivant le rayon ; elle ne doit jamais dépasser $0^m,40$; on la fait ordinairement égale à $0^m,30$ ou $0^m,35$, et il vaudrait mieux ne lui donner que de $0^m,25$ à $0^m,28$, afin de faire agir l'eau sur la plus grande hauteur possible, et de diminuer sa vitesse relative W à son entrée dans la roue ;
v vitesse de la circonférence extérieure de la roue ;
$L = l + 0^m,10$ ou 0,13 longueur des augets, mesurée entre les couronnes.

Avec une vitesse de $1^m,30$ à $1^m,40$, une roue à augets dépense convenablement de 70 à 100 litres d'eau par seconde et par mètre de longueur de roue.

La levée verticale de la vanne dépasse rarement $0^m,10$ à $0^m,12$; elle est souvent de $0^m,04$ à $0^m,05$ et quelquefois moins ; cette faible épaisseur de la veine fluide rend facile son introduction dans les augets.

L'ouverture des augets, c'est-à-dire la plus petite distance de deux aubes consécutives, est égale, non compris l'épaisseur du bois, qui est de $0^m,03$ environ, à l'épaisseur de la veine fluide augmentée de $0^m,01$. La distance des aubes, mesurée suivant la circonférence extérieure de la roue, varie de $0^m,30$ à $0^m,40$; elle est ordinairement égale à la hauteur des couronnes. De cet écartement et du diamètre de la roue on déduit le nombre des aubes, qui doit toujours être divisible par celui des bras ; l'espace compris entre deux bras doit contenir un nombre entier d'augets.

La forme des augets est variable ; mais le plus souvent l'aube se compose de deux parties, dont l'une A est dirigée suivant le rayon de la roue et égale à la moitié de la hauteur AC de la couronne, et dont l'autre BD joint le point B à l'extrémité D du rayon passant par le fond de l'auget suivant.

Fig. 73.

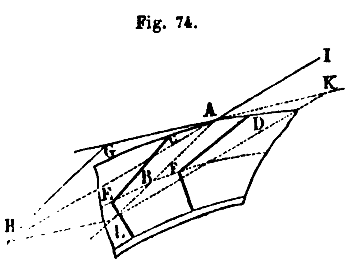
D'Aubuisson fait le fond EF égal à 1/3 de ED, qui est ordinairement égal à $0^{m},30$, et il mène FG faisant l'angle GFE de 110° à 118°, suivant que les roues ont de 4 mètres à 12 mètres de diamètre ; l'angle que fait GF avec la tangente à la circonférence extérieure au point G est de 31°, et il ne doit jamais dépasser 33°. On obtient cette disposition dans la pratique, en prenant simplement GH égal à $0^{m},04$ ou $0^{m},05$, quand, comme le conseille d'Aubuisson, on a eu soin de prendre la distance IF égale à $0^{m},32$ environ. Dans tous les cas, la plus petite distance IK de deux aubes consécutives, non compris l'épaisseur des aubes, doit être au moins égale à l'épaisseur de la lame fluide augmentée de $0^{m},01$. D'Aubuisson conseille de ne pas donner à IK moins de $0^{m},11$ à $0^{m},12$.

Quelquefois la partie extérieure de l'aube est brisée comme l'indique la forme LMNP ; l'angle LPN varie de 59° à 60°, et celui que fait LM avec la tangente à la circonférence extérieure au point L, de 25° à 30°. On prend PN égal à la moitié de PQ, et PR compris ordinairement entre les 3/4 et les 5/6 de PQ. Cette forme a l'avantage de donner plus de capacité à l'auget et de diminuer le choc de l'eau ainsi que la hauteur de déversement ; mais la construction en est plus difficile.

La forme d'une courbe continue ST, dont l'élément extérieur fait un angle très faible avec la tangente à la circonférence extérieure au point S, est celle qu'on doit préférer, soit pour diminuer les réactions de l'eau, soit pour augmenter la capacité des augets, soit aussi pour leur faire conserver l'eau sur la plus grande hauteur de chute possible ; c'est la disposition adoptée pour les aubes en tôle, mais elle est presque impraticable pour les aubes en bois.

Direction du filet moyen. La forme de l'auget étant déterminée, il faut donner à la lame fluide une direction telle, que les différents filets qui la composent pénètrent dans l'auget en choquant le moins possible les deux faces de la partie extérieure de l'aube. Dans la pratique, on déterminera la direction à donner au filet moyen de la lame fluide qui rencontre la circonférence extérieure de la roue au point A (*fig.* 74), en menant la ligne AB qui divise en deux parties

Fig. 74.

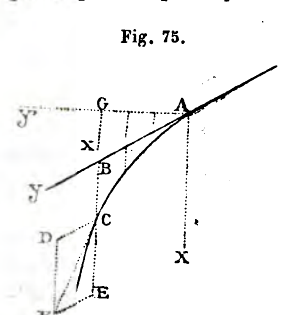


égales les deux arcs CD et EF, compris entre les parties extérieures des deux aubes consécutives; puis, prenant à partir du point A, sur la tangente à la circonférence extérieure de la roue, une distance AG, représentant, à une échelle quelconque, la vitesse *v* de la roue, si par le point G on mène GH parallèle à AB, et que du point A comme centre, avec un rayon AH égale à la vitesse V du filet moyen à son arrivée sur la roue, on décrive un arc de cercle qui coupe GH au point H, la ligne HA prolongée en AI représentera la direction à donner au filet moyen à son arrivée sur la roue. En effet, si l'on construit le parallélogramme AGHL des vitesses, AL représentera en grandeur et en direction la vitesse relative W (p. 293) et les différents filets composant la veine fluide choqueront le moins possible les deux faces de l'aube pendant tout le temps de leur introduction dans l'auget.

Si l'eau a la même vitesse moyenne dans toute la longueur du coursier d'arrivée, l'épaisseur de la lame y est uniforme; ce qu'on peut généralement supposer dans le cas des roues à augets; il en résulte que le fond du coursier est parallèle au filet moyen, c'est-à-dire à AI. Comme on connaît la vitesse de l'eau dans le coursier, ainsi que le débit et la section du coursier, on en conclut la profondeur de la lame fluide et, par suite, la position du fond du coursier, qu'on place à une distance du filet moyen égale à la demi-épaisseur de la lame. Si le coursier était trop incliné pour que la vitesse de l'eau fût la même sur toute sa longueur, on déterminerait la vitesse à son origine et à son extrémité à l'aide des formules du n° 152; de ces vitesses on conclurait les épaisseurs de la lame fluide, et, par suite, la position du fond du coursier par rapport à celle du filet moyen.

Dans la construction précédente, on a déterminé la direction à donner au filet moyen en supposant qu'il se mouvait, après avoir quitté le coursier, dans la direction qu'il possédait auparavant, ce qui n'a pas lieu; car, outre le dénivellement qui existe à l'extrémité du coursier et qui fait baisser un peu la direction du filet moyen, la pesanteur le fait descendre dès qu'il a quitté l'extrémité du coursier, et lui fait décrire, comme à un corps lancé dans l'espace, une parabole dont la tangente en un point quelconque représente la direction de la vitesse du filet moyen en ce point (*Int.* 1214 et 1513). Il conviendra donc, dans le cas où le coursier ne versera pas son eau très près de la roue, soit à cause de l'épaisseur de son fond, soit à cause du jeu laissé entre ce fond et la roue, de prendre pour AI la tangente à cette parabole au point où elle rencontre la circonférence extérieure de la roue.

Fig. 75.



On tracera la courbe décrite par le filet fluide, à partir du point A situé en amont de l'extrémité du coursier, à une distance environ égale à l'épaisseur de la lame fluide, en considérant qu'à partir de ce point il est

soumis à une vitesse initiale constante V, qui lui a fait parcourir, suivant le prolongement de IA, après un temps t, une distance $AB = y = Vt$ (6), et à l'action de la pesanteur, qui lui a communiqué, après le même temps t, une vitesse verticale égale à gt, et lui a fait parcourir un espace vertical $BC = x = 1/2\, gt^2$ (18). En donnant à t différentes valeurs, et déterminant les valeurs correspondantes de y et de x, on a la position du filet moyen après un temps quelconque; ce qui permet de tracer par points la courbe qu'il décrit.

Le filet moyen possède, après le temps t, c'est-à-dire quand il est arrivé au point C, une vitesse $CD = V$ parallèle à AB, et une vitesse verticale $CE = gt$; formant alors le parallélogramme DCEF, sa diagonale CF, qui sera tangente à la courbe, représentera en grandeur et en direction la vitesse réelle du filet moyen au point C; d'où l'on voit qu'au moyen d'une épure, il est facile de déterminer non seulement la direction du filet fluide au moment où il choque un point quelconque de l'aube ou de l'eau qui se trouve dans l'auget, mais aussi l'intensité de la vitesse qu'il possède en ce point.

Des valeurs précédentes de y et de x, on conclut:

$$y^2 = \frac{2V^2}{g} x,$$

ou, en faisant $V^2 = 2gh$:

$$y^2 = 4hx.$$

D'où l'on peut conclure, comme pour un corps lancé dans l'espace sous une direction quelconque, que le filet fluide décrit, en négligeant aussi la résistance de l'air, une parabole dont le paramètre est égal à deux fois la hauteur h due à la vitesse initiale (*Int.* 1195).

Si au lieu de prendre pour axe des y la direction initiale AB, on prend l'horizontale AG, on a, en désignant l'angle GAB par α:

$$x' = y' \operatorname{tang} \alpha + \frac{g}{2V^2 \cos^2 \alpha} y'^2,$$

et dans le cas où α serait nul, on aurait:

$$x' = \frac{g}{2V^2} y'^2, \quad \text{d'où} \quad y'^2 = \frac{2V^2}{g} x' = 4hx'.$$

Même équation que dans le cas précédent.

Vannage. Il se fait de deux manières, suivant que la roue prend l'eau au-dessus de son sommet, ou à une certaine hauteur au-dessous. Dans le premier cas, si le niveau de l'eau est tout à fait constant, on établit le point supérieur de la roue à $0^m,20$ ou $0^m,25$ au-dessous de ce niveau, et à l'aide d'un coursier, dont le fond est en fonte, afin de lui donner le moins d'épaisseur possible, on amène l'eau sur la roue. Le fond du coursier se prolonge jusque vers le sommet de la roue, et il convient même de l'arrêter à une distance de $0^m,10$ environ en amont; l'eau par sa vitesse acquise n'arrive dans l'auget qu'au delà de ce sommet. Pour em-

pêcher l'eau de rejaillir sur les côtés, on prolonge les parois verticales du coursier sur une étendue d'environ trois augets au delà de l'extrémité du fond du coursier. Le jeu entre le fond du coursier et la roue étant de 0m,01, l'eau arrive sur la roue en aval, mais très près du sommet, avec une faible vitesse, qui doit être supérieure à celle de la roue, et si l'on ne donne à la couronne que de 0m,25 à 0m,28 de hauteur suivant le rayon de la roue, ce qui diminue la profondeur de l'auget et, par suite, la vitesse d'arrivée de l'eau contre le fond de cet auget tout en augmentant la hauteur d'action de l'eau sur la roue, on se trouve dans les meilleures conditions sous le rapport de l'effet utile rendu par la roue. Lorsque le niveau de l'eau est variable, on établit le seuil de la vanne assez bas pour que, pendant les plus basses eaux, le débit soit encore suffisant pour la marche de régime de la roue. Le coursier ne doit pas avoir, si cela est possible, plus de 1 mètre ou 1m,50 depuis la vanne, avec une inclinaison de 1/12 au plus.

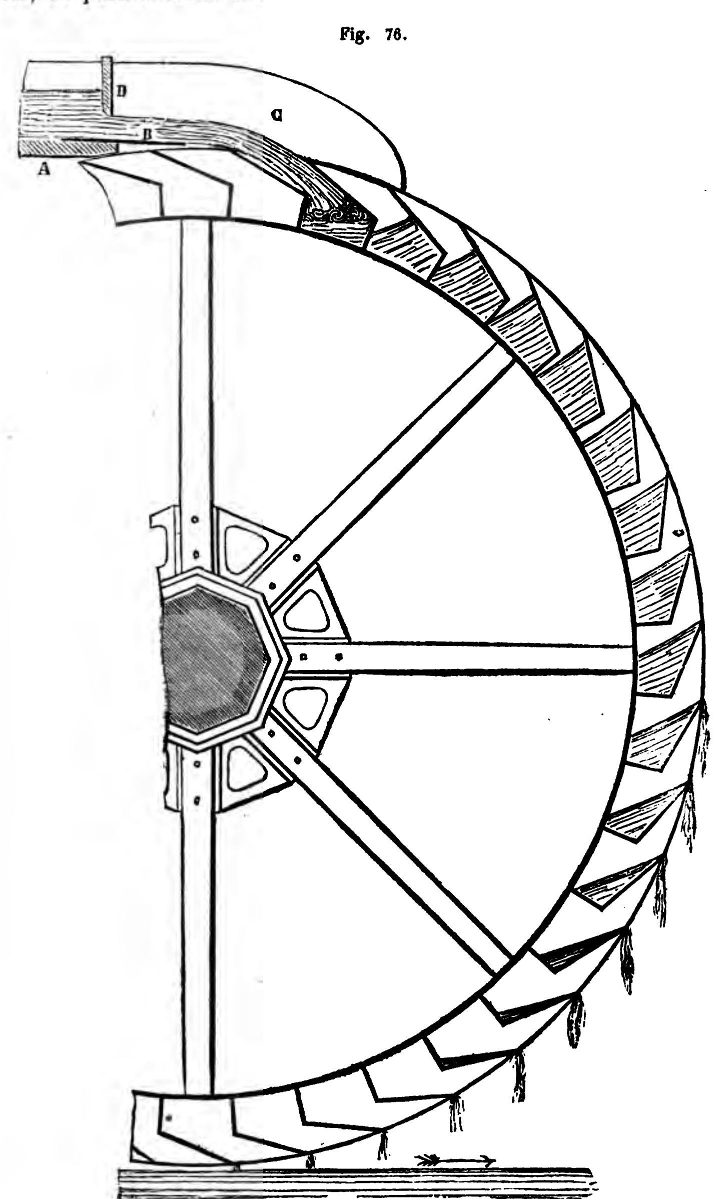
Lorsque, pendant un certain temps de l'année, le niveau sera inférieur d'une certaine quantité au niveau le plus bas pour lequel la roue peut être établie, il conviendra, malgré la plus grande perte de chute due à l'introduction de l'eau dans les augets, et la plus grande hauteur de déversement de ces augets, hauteur qui croît avec le diamètre de la roue, de faire arriver l'eau à une certaine distance au-dessous du sommet de la roue, du côté d'amont. Dans ce cas, la vanne devra encore être établie pour pouvoir alimenter convenablement la roue pendant les plus basses eaux. Le point supérieur de la roue se place de manière que la vanne ne soit pas trop inclinée, sans cependant prendre un diamètre de roue trop grand; pour des roues d'un diamètre moyen, il convient de le placer à 1m,15 environ au-dessus du niveau supérieur des plus grandes eaux. Pour les constructions soignées, on emploie, dans ce cas, pour distribuer l'eau sur la roue, le vannage en fonte (*fig.* 25) (153), dont la direction du filet moyen de chaque veine fluide partielle se détermine comme il a été indiqué page 305, en prenant pour V la vitesse la plus générale dans chaque orifice. Ordinairement la vanne ne peut que plonger, et les orifices inférieurs ne s'ouvrent qu'après ceux du haut; mais en disposant la vanne de manière qu'on puisse l'élever et l'abaisser à volonté au-dessus et au-dessous des orifices, et en plaçant les orifices supérieurs pour les plus grandes eaux, et les orifices inférieurs pour les plus basses, on diminuera considérablement les irrégularités de la vitesse d'arrivée de l'eau sur la roue.

Dans les constructions moins soignées, tous les orifices du vannage précédent sont remplacés par un seul, dont les parois sont en bois, et qui doit encore produire un débit convenable pendant les plus basses eaux.

303. Position des roues à augets par rapport au niveau d'aval. Les roues recevant l'eau en dessus et tournant en sens contraire du mouvement de l'eau dans le canal de fuite, elles ne doivent jamais être établies au-dessous du niveau supérieur de l'eau dans ce canal. Au contraire, les roues recevant l'eau en dessous du sommet et marchant dans le sens de

l'eau dans le canal d'aval, elles peuvent sans inconvénient être noyées de la 1/2 hauteur de la couronne, et elles le seront même avec avantage si elles sont emboîtées d'un coursier circulaire qui empêche le déversement de l'eau. Cette propriété des roues à augets recevant l'eau de côté, de permettre au niveau d'aval de varier dans des limites assez

Fig. 76.



étendues, sans que l'effet utile soit sensiblement altéré, les fait très souvent préférer aux roues recevant l'eau en dessus.

Quand les roues sont noyées, il convient de garnir le fond de chaque auget d'une soupape qui s'ouvre au moment où ce fond arrive dans la position verticale inférieure, de manière à permettre à l'air d'entrer dans l'auget lorsque l'eau en sort. Quelquefois le fond de chaque auget est garni, suivant qu'il est plus ou moins long, d'un, deux ou trois trous de $0^m,04$ de diamètre; ces trous produisent le même effet que la soupape dont il vient d'être question; mais ils donnent lieu à une perte d'eau.

La figure 76 représente, à l'échelle de 1/40, la coupe perpendiculaire à l'axe d'une roue à augets recevant l'eau en dessus.

A fond du coursier en bois; il se prolonge jusqu'à une distance de $0^m,10$ en amont de l'axe de la roue par une plaque de fonte B;
C prolongement des joues latérales du coursier pour empêcher l'eau de jaillir hors de la roue;
D vanne,

304. **Roues se mouvant dans un courant à grande section, dites roues pendantes.** L'équilibre dynamique donne, pour une seconde:

$$\mathcal{T}_m = k\,\frac{1\,000\,SV(V-v)v}{g}.$$

$\mathcal{T}_m$ travail moteur que peut transmettre l'arbre de la roue;
k coefficient, qui est égal à 0,84 environ d'après les expériences de Bossut, et à 0,80 d'après les observations de Poncelet sur les roues des moulins sur bateaux établis sur le Rhône, à Lyon;
S section de la partie plongée de la couronne, ou surface de la partie plongée de l'aube placée sur le rayon vertical de la roue, mesurée suivant ce rayon;
V vitesse à la surface du courant au point où se trouve la roue; on peut la considérer comme étant la vitesse moyenne de tous les filets qui rencontrent l'aube, à leur arrivée sur cette aube;
v vitesse du centre de gravité de la partie plongée de l'aube;
$1000\,SV$ poids d'eau qui afflue par seconde sur la partie plongée de la couronne;
$V - v$ vitesse relative d'arrivée de l'eau sur les aubes (*Int.* 1508).

Pour des valeurs déterminées de S et de V, $\mathcal{T}_m$ sera maximum quand on aura $v = \frac{1}{2}V$ (mêmes considérations que n° 292). Dans la pratique, on a été conduit à faire $v = 0,4V$, ce qui théoriquement diminue $\mathcal{T}_m$ de $\frac{1}{25}$ environ.

Faisant, dans la formule précédente, $k = 0,80$, $v = 0,4V$ et $g = 9,8088$, on a sensiblement:

$$\mathcal{T}_m = 20SV^3.$$

La longueur des roues varie de $2^m,50$ à 5 mètres, et leur diamètre extérieur ne dépasse guère 4 ou 5 mètres. La hauteur des aubes doit être de 1/5 à 1/4 du rayon de la roue; elle ne doit pas être inférieure à $0^m,33$, et elle est ordinairement comprise entre $0^m,50$ et $0^m,80$. L'écartement des aubes, mesuré sur la circonférence extérieure de la roue,

est égal à leur hauteur. Le nombre des aubes est ordinairement égal à 12, mais il y aurait avantage à le porter à 18 et même à 24. Les aubes doivent être complètement noyées, mais pas de plus de 0m,05 au-dessus de leur arête intérieure. Cependant, quand la profondeur du courant est considérable, on augmente quelquefois cette hauteur d'immersion; ainsi, pour les moulins du Rhône, elle va jusqu'à 0m,50. Des couronnes, ou simplement des rebords de 0m,05 à 0m,10 de saillie sur les extrémités des aubes, produisent un bon effet. Navier conseille d'incliner les aubes sur le rayon, du côté d'amont, sous un angle de 30° quand la roue plonge de 1/4 à 1/5 de son rayon, et de 15° quand elle plonge de 1/3 de son rayon, proportion maximum d'immersion.

305. Turbines. Ces roues, dont l'axe est vertical, sont plus aptes à fonctionner, étant noyées, que les précédentes, et même quand l'eau est en assez grande abondance pour remplir les canaux formés par les aubes, et que ces canaux sont convenablement proportionnés, ces roues fonctionnent à peu près noyées comme hors de l'eau. Il n'en est plus de même dès que l'eau cesse de sortir à plein tuyau, car alors l'eau d'aval tendant à pénétrer dans les canaux, elle produit des réactions et par suite une perte de travail.

Les turbines se divisent en deux types bien distincts : le premier comprend les turbines versant l'eau en dessous, et le deuxième celles qui versent l'eau latéralement. Il y aurait encore à distinguer les turbines dont les canaux sont pleins pendant la marche, de celles où l'eau ne remplit qu'imparfaitement ces canaux.

Les turbines pouvant recevoir l'eau sur tout leur contour à la fois, elles sont d'un très petit diamètre; un autre avantage, dans certains cas, c'est qu'elles ont une vitesse de rotation très grande, ce qui simplifie souvent les transmissions de mouvement; de plus encore, cette vitesse de rotation peut varier dans des limites assez étendues sans que le rendement soit sensiblement altéré; enfin on peut dire que les turbines s'appliquent à toute hauteur de chute, puisque dans l'industrie les limites utilisées jusqu'à présent sont 0m,30 et 108 mètres.

La turbine versant l'eau en dessous a été proposée en 1750 par Ségner, et ses dispositions générales par Euler en 1754, qui en a donné la théorie en 1767, et Navier en 1819. En 1824, cette roue a été perfectionnée et construite par Burdin, ingénieur en chef des mines, qui lui a donné le nom de *turbine*. Cette turbine, perfectionnée dans ces derniers temps par beaucoup d'ingénieurs et constructeurs, est celle qu'on établit le plus aujourd'hui. En 1832, Fourneyron a pris un brevet pour une turbine versant l'eau latéralement; depuis, il a construit un très grand nombre de ces roues.

Que les turbines versent en dessous ou latéralement, on doit les établir pour le plus grand débit qu'elles devront effectuer et pour la plus faible chute sous laquelle elles devront fonctionner.

306. Turbines versant l'eau en dessous. Afin que le travail de la roue soit aussi grand que possible, il faut :

1° Que les ajutages adducteurs formés par les courbes directrices soient évasés du côté du réservoir supérieur afin d'éviter le travail résistant qui se manifeste à l'entrée des ajutages cylindriques ou prismatiques;

2° Que l'eau entre sans choc dans la roue;

3° Que l'eau, à sa sortie de la roue, ne possède qu'une très petite vitesse absolue V′, qui ne peut être nulle, puisqu'elle doit satisfaire au débit;

4° Que l'eau coule dans la roue en filets sensiblement parallèles, ce qui a lieu quand le canal formé par deux aubes consécutives ne présente pas d'étranglements, résultat qu'on obtient en faisant assez grande la hauteur de la roue.

Soient (*fig.* 77) :

r le rayon moyen de la turbine, c'est-à-dire du cylindre vertical passant par le milieu de la longueur des aubes; tout ce qui suit se rapporte aux points de la roue situés à la distance r de l'axe;

V la vitesse de l'eau à son arrivée sur la roue, représentée en grandeur et en direction par AV;

v la vitesse de la roue au point A milieu de la longueur des aubes, représentée en grandeur et en direction par Av;

W la vitesse relative d'arrivée de l'eau contre l'aube; elle est égale à la résultante AW de la vitesse V, et de la vitesse AB qui est égale à v prise en sens contraire (*Int.* 1510 et 1511), et sa direction est celle qu'on doit donner à l'élément supérieur de l'aube;

W′ la vitesse relative de l'eau au point C, bas de l'aube, par rapport à cette aube; elle est représentée en grandeur et en direction par CW′, qui est dirigée suivant le dernier élément de l'aube;

V′ la vitesse absolue que conserve l'eau à sa sortie de la roue; elle est égale à la résultante CV′ de la vitesse W′ et de la vitesse v;

α l'angle que fait la direction AV du filet moyen avec l'horizontale;

β l'angle que fait la direction du dernier élément de l'aube avec l'horizontale;

h la hauteur du niveau de l'eau dans le bief d'amont au-dessus de la face supérieure de la turbine;

h' la hauteur de la turbine;

$H = h + h'$ la chute totale, la turbine n'étant pas noyée;

a et a' les distances d'axe en axe de deux directrices et de deux aubes consécutives mesurées sur la circonférence du rayon r;

e et e' les épaisseurs respectives des directrices et des aubes;

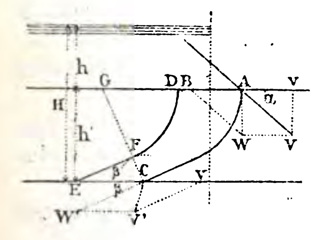
n et n' les nombres de directrices et d'aubes;

l et l' les dimensions, mesurées suivant le rayon de la roue, des canaux formés par les aubes, à la partie supérieure et à la partie inférieure de la roue; l est aussi la dimension des canaux formés par les directrices;

k et k' les coefficients de contraction applicables à la sortie des canaux formés par les directrices et de ceux formés par les aubes;

N le nombre de tours de la roue par minute.

Fig. 77.



On a (*Int.* 1524) :

$$W^2 = V^2 + v^2 - 2Vv\cos\alpha. \quad (1)$$

Pour qu'il n'y ait pas choc à l'entrée de l'eau dans la roue, l'élément supérieur de l'aube doit être dirigé suivant la direction de la vitesse relative W, et pour le cas où cette vitesse serait verticale, on aurait :

$$v = V\cos\alpha, \quad \text{et} \quad W^2 = V^2 - v^2 = V^2(1-\cos^2\alpha).$$

Le long de la courbe AC, la veine fluide restant à égale distance de l'axe, la force centrifuge ne produit aucun travail, et par suite ne modifie pas la vitesse relative, qui devient alors telle au point C, en négligeant les frottements, et en supposant que la pression atmosphérique agit seule en A et C, c'est-à-dire que l'eau d'aval affleure le dessous de la turbine. On a alors :

$$W'^2 = W^2 + 2gh' \tag{2}$$

et

$$V'^2 = W'^2 + v^2 - 2W'v\cos\beta. \tag{3}$$

La vitesse V' ne peut être tout à fait nulle, puisqu'elle doit satisfaire au débit; mais elle devient très faible en faisant β très petit et en admettant la relation:

$$W' = v. \tag{4}$$

A l'aide des quatre équations ci-dessus, on peut déterminer les éléments nécessaires pour établir la turbine.

Ajoutant les équations (1) et (2), on obtient, en faisant $W' = v$:

$$v = \frac{V^2 + 2gh'}{2V\cos\alpha},$$

ou, en remarquant qu'on peut poser $V^2 = 2gh$:

$$v = \frac{gH}{\cos\alpha\sqrt{2gh}}, \quad \text{d'où} \quad \frac{v^2}{2g} = \frac{H^2}{4h} \times \frac{1}{\cos^2\alpha}. \tag{5}$$

H étant donnée, on peut choisir à volonté deux des trois quantités α, h et v; supposant, par exemple, $h = 0{,}9\,H$, et, comme dans les turbines Fontaine-Baron, $\alpha = 15°$ ou $\cos\alpha = 0{,}966$, on en conclut $v = 0{,}55\sqrt{2gH}$.

Connaissant v ou son égale W', de l'équation (3), on tire, en faisant, comme dans les turbines Fontaine-Baron, $\beta = 20°$ ou $\cos\beta = 0{,}94$:

$$V'^2 = 2v^2(1 - \cos\beta) = 0{,}12v^2, \tag{6}$$

et dans le cas de l'hypothèse précédente :

$$V'^2 = 0{,}12 \times (0{,}55)^2 \times 2gH, \quad \text{ou} \quad \frac{V'^2}{2g} = 0{,}036\,H.$$

La perte de chute due à la vitesse V' que conserve l'eau étant 0,036 H, la chute utilisée est, en supposant que le niveau d'aval coïncide avec le plan inférieur de la roue, 0,964 H, et le travail transmis à la roue est 0,964 QH, Q étant le poids d'eau dépensé.

Le travail transmis à la roue est d'autant plus grand que la vitesse V' est plus petite. En mettant dans l'équation (6) la valeur (5) de v, on conclut:

$$\frac{V'^2}{2g} \times \frac{1}{H} = \frac{H}{2h} \times \frac{1 - \cos\beta}{\cos^2\alpha}. \tag{7}$$

Le premier membre de cette égalité exprime le rapport de la chute perdue à la chute totale, et le second montre que ce rapport est d'autant plus petit que la hauteur h' de la turbine et l'angle α sont plus petits (h augmente quand h' diminue). Mais comme à mesure que h' et α diminuent, le canal formé par deux aubes consécutives est courbé plus brusquement, il y a une limite à laquelle il faut s'arrêter, sans quoi le liquide ne se mouvrait plus en filets parallèles, et il se formerait sur la paroi convexe du canal des remous qui diminueraient le travail utile. Ainsi les tangentes à l'aube en A et C doivent faire entre elles un angle très ouvert, et la longueur AC de l'aube ne doit pas être trop petite. On satisfait convenablement à la première condition en faisant en sorte que dans le triangle AvV l'angle AvV soit au plus de 90°, c'est-à-dire qu'on ait $V \leqq \frac{v}{\cos\alpha}$ ou en remplaçant v par sa valeur (5) et en faisant $V = \sqrt{2gh}$, $\cos^2\alpha \leqq \frac{H}{2h}$. Substituant cette valeur dans la formule (7), on a pour le rapport du rendement au travail total:

$$\left(H - \frac{V'^2}{2g}\right)\frac{1}{H} \leqq \cos\beta.$$

307. Turbines de Fontaine-Baron. Ces turbines se trouvent dans les conditions des considérations théoriques précédentes, dues à Bélanger. Quand le niveau d'aval est constant et que la chute est assez grande, elles sont préférables à celles versant l'eau latéralement. Lorsque la couronne est complètement remplie, elles peuvent être noyées; mais dans le cas contraire, elles doivent fonctionner hors de l'eau.

Dans la pratique :

Il est prudent de ne compter que sur un rendement $\mathcal{T}_m = 0{,}65PH$ quand les vannes sont entièrement levées et la turbine dénoyée, quoiqu'on ait souvent obtenu $\mathcal{T}_m = 0{,}70PH$ et même plus ;

On a environ $V = 0{,}80\sqrt{2gH}$ à $0{,}85\sqrt{2gH}$, et $v = 0{,}50\sqrt{2gH}$ à $0{,}60\sqrt{2gH}$; v peut varier entre des limites assez étendues sans que l'effet utile change sensiblement;

Ordinairement $\alpha = 11°$ à $15°$, et s'élève quelquefois jusqu'à $25°$; $\beta = 20°$ et monte parfois jusqu'à $25°$ et même $30°$;

$k = 0{,}85$ et $k' = 0{,}90$;

$n' = 2n$ à $2{,}4n$, et, par suite, $a = 2a'$ à $2{,}4a'$; $a' = 0^m{,}06$ à $0^m{,}08$ et jusqu'à $0^m{,}15$;

Pour de grandes dépenses d'eau, 2^{mc} et plus, sous des chutes moyennes ou petites, la plus courte distance $a\sin\alpha - e$ de deux courbes directrices voisines peut être de $0^m{,}06$ à $0^m{,}08$; mais il convient en général qu'elle soit plus petite;

La hauteur h' de la roue est à peu près égale à $2a'$;

La largeur l est assez ordinairement égale à 1/5 ou 1/6 du rayon moyen r de la roue; l va en s'agrandissant depuis le dessus de la roue jusqu'à la partie inférieure, où elle devient $l' = 1{,}1l$ environ; cet évasement de la couronne contenant les aubes est symétrique par rapport à la circonférence moyenne de la roue;

La distance des verticales passant l'une par le haut et l'autre par le bas d'une aube est égale à $\frac{12}{7}a'$ environ.

Les directrices sont coulées en fonte avec les deux enveloppes annulaires assemblées sur un fond fixe ; les aubes sont également coulées avec les couronnes qui les limitent.

Application. Soit à établir une turbine Fontaine pour un débit de $1^{mc},50$ d'eau par seconde, sous une chute de 3 mètres ; ce qui correspond, en admettant un rendement de 0,65, à une force de 39 chevaux.

Posant $\alpha = 15^\circ$ ou $\sin\alpha = 0,26$, et $e = 0^m,01$, on a d'abord, en prenant $0^m,042$ pour la plus courte distance de deux directrices voisines :

$$a\sin\alpha = 0^m,042 + 0^m,01 \text{ ou } a = \frac{0,052}{0,26} = 0^m,20 \text{ et } a' = 0^m,10,\ h' = 0^m,20.$$

Faisant $k = 0,85$, $V = 0,85\sqrt{2gH} = 0,85 \times 7,672 = 6^m,52$ et $l = 0,2r$,

$$\text{on a :} \qquad 2\pi r = na, \quad \text{ou} \quad r = \frac{na}{2\pi}, \quad \text{et} \quad l = 0,1\frac{na}{\pi};$$

$$Q = kV \times 0,042\,ln = kV \times 0,0042\frac{a}{\pi}n^2;$$

$$n = \sqrt{\frac{\pi Q}{kV \times 0,0042 \times a}} = \sqrt{\frac{3,1416 \times 1,50}{0,85 \times 6,52 \times 0,0042 \times 0,20}} = 32,$$

et

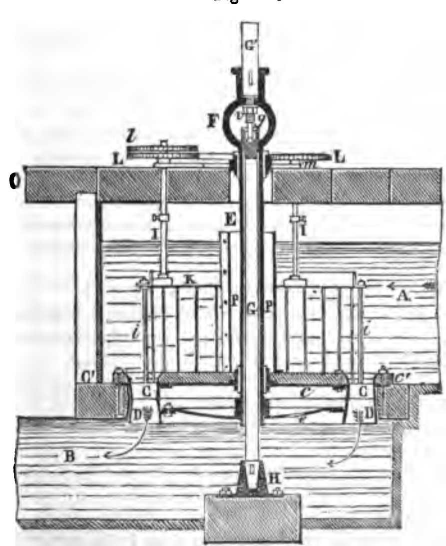
$$n' = 64;$$

$$r = \frac{32 \times 0,20}{2 \times 3,1416} = 1^m,01,\ l = 0,2 \times 1,01 = 0^m,202 \text{ et } l' = 1,1 \times 0,202 = 0^m,222.$$

Admettant que $v = 0,55\sqrt{2gH} = 0,55 \times 7,672 = 4^m,22$, on a :

$$N = \frac{v \times 60}{2\pi r} = \frac{4,22 \times 60}{6,35} = 40.$$

Fig. 78.



Les aubes doivent aussi pouvoir débiter le volume:

$$Q = k'W'l'(2\pi r \sin\beta - n'e');$$

d'où, en faisant $W' = v = 4^m,22$ et $e' = e = 0^m,01$,

$$\sin\beta = \frac{Q - k'W'l'n'e'}{k'W'l' \times 2\pi r} = \frac{1,50 - 0,90 \times 4,22 \times 0,222 \times 0,64}{0,90 \times 4,22 \times 0,222 \times 6,35} = 0,1794.$$

Ce sinus correspondant à $\beta = 10°20'$, on voit qu'en faisant $\beta = 20°$, l'eau sera loin de remplir complètement les canaux formés par les aubes; elle agira par libre déviation, et alors il faudra éviter de noyer la turbine.

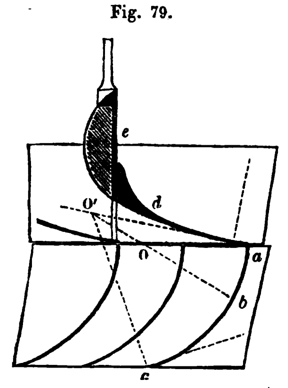
La figure 78 représente, à l'échelle de 1/60, une turbine de Fontaine, de la force de 18 chevaux, construite à l'établissement de Vadenay, près Châlons-sur-Marne. La chute moyenne est de $1^m,40$ et la dépense de 1 400 litres par seconde. Cette roue fait marcher quatre ou cinq paires de meules.

A bief supérieur;
B canal de fuite;
C couronne en fonte portant 32 cloisons ou directrices qui forment autant de canaux amenant l'eau sur les aubes de la roue; la couronne et les directrices sont venues d'une seule pièce de fonte;
D couronne en fonte de $0^m,235$ de hauteur formant la roue proprement dite; elle porte 64 aubes venues de fonte avec les 2 cylindres qui la composent;
e disque servant de bras à la roue; il est creusé en forme de vasque, et, afin de pouvoir le nettoyer au besoin et serrer les écrous et les vis de pression qui fixent son moyeu sur le cylindre E, on l'a percé de trous vers le milieu de son rayon;
E cylindre en fonte servant d'arbre moteur; des vis de serrage fixent le moyeu du disque *e* à ce cylindre, sur lequel le moyeu entre à frottement;
F renflement du cylindre E;
G arbre fixe en fer de $0^m,07$ de diamètre;
H sabot en fonte dans lequel est claveté l'arbre G, et qui est solidement fixé sur une forte pierre de taille;
G′ arbre proprement dit de la roue; il est solidement claveté dans le haut du cylindre E;
g pivot en fer forgé aciéré par le bas, par lequel la roue, son arbre G′ et le cylindre E reposent sur le support G, qui porte à son sommet une crapaudine en bronze à grain d'acier. L'idée de faire ainsi reposer tout le poids de la partie mobile sur un pivot supérieur, ce qui rend le graissage facile, est due à M. Arson;
v écrou fixant le pivot *g* au système mobile, et réglant la hauteur de celui-ci;
i tiges de petites vannes en fonte et bois qui ferment chacune un des canaux qui amènent l'eau sur la roue;
K couronne en fonte sur laquelle sont fixées les 32 tiges *i*;
I trois tiges fixées à la couronne K; elles sont filetées à leur partie supérieure, et elles portent chacune une douille, qui, en venant heurter contre le plancher O, limite la course de la tige et par suite celle des vannes;
LL roues en fonte autour desquelles passe une chaîne sans fin qui les fait tourner simultanément; les moyeux de ces roues sont taraudés et reçoivent le haut des tiges I; de sorte que ces tiges montent ou descendent suivant qu'on tourne dans un sens ou dans l'autre;
l roue d'engrenage fixée sur une des roues L; elle est manœuvrée par un pignon dont l'arbre porte une roue conique qui s'engrène avec un pignon monté sur l'arbre d'une manivelle;
m croisillons en fonte réglant l'écartement des tiges I; ils sont réunis par un moyeu qui porte un coussinet en bronze dans lequel tourne le cylindre E;

c disque servant de bras à la couronne C; son moyeu porte un coussinet en bronze qui guide le cylindre E à sa partie inférieure;
c' plateau en bois de chêne formant l'ouverture des canaux directeurs;
C' cadre en bois sur lequel sont boulonnés la couronne fixe C et le plateau c'; il est scellé dans les murs de fondation, et placé à la hauteur du niveau inférieur ordinaire de l'eau;
P cylindre en fonte formé de deux parties boulonnées, fixé sur le plateau c', et empêchant le contact de l'eau avec le cylindre tournant E;
O plancher de l'usine.

La figure 79 représente, à l'échelle de 1/15, le tracé des aubes, des directrices et des petites vannes.

Fig. 79.



L'aube est formée de deux arcs de cercle : l'un *ab* a son centre O situé sur le plan qui limite supérieurement la turbine, de sorte que cet arc est normal à ce plan; l'autre *bc* a son centre O' situé au-dessus de ce plan, à une distance telle que, *bc* étant tangent à *ab* au point *b*, il fasse avec le plan inférieur de la roue un angle qui ne dépasse pas 19 à 20°.

Au lieu de faire l'élément supérieur de l'aube verticale, il convient (*fig.* 77) de le diriger suivant AW, diagonale du parallélogramme construit sur AV et $AB = v$. Pour $V = 0{,}80\sqrt{2gH}$ et $v = 0{,}55\sqrt{2gH}$, on prend AV et AB proportionnels à 0,80 et 0,55, et terminant le parallélogramme, on a la direction de AW. Les aubes sont ainsi plus courbées par le haut; c'est ce qui a lieu aujourd'hui dans les turbines de Fontaine.

La directrice *ad* se termine inférieurement par un arc de cercle formant avec le plan supérieur de la roue un angle qui ne dépasse pas ordinairement 11 ou 12°. A la partie supérieure, on donne à la directrice la forme qui permet le mieux l'introduction de l'eau.

Chaque vanne est formée par une plaque en fonte *e*, qui glisse contre le haut d'une directrice et dans deux rainures faites dans les couronnes, et qui vient se reposer sur la partie inférieure de la directrice consécutive quand la vanne est abaissée. Derrière la plaque *e* se trouve fixée une garniture en bois, qu'on taille de manière à favoriser l'introduction de l'eau.

Les turbines de Fontaine rendent un effet utile égal aux 0,68 ou 0,70 du travail absolu du moteur quand les vannes laissent entièrement ouverts les canaux directeurs. Lorsqu'on abaisse les vannes de manière à réduire la dépense dans le rapport de 4 à 3 environ, l'effet utile est encore les 0,575 du travail absolu du moteur à la vitesse du maximum d'effet.

La vitesse de la circonférence moyenne de la roue, correspondant au maximum d'effet, est les 0,55 de la vitesse due à la hauteur de chute (133), et elle peut varier de son 1/4, en plus ou en moins, sans que l'effet soit sensiblement diminué.

Une turbine Fontaine-Baron, établie à la filature d'Haudrecy, avec les aubes, dites *à déviation*, de Girard et Callon (310), a donné au frein un rendement moyen de 77 p. 100 ; les constructeurs, MM. Fromont, Fontaine et Brault, de Chartres, avaient garanti 70 p. 100. La chute a varié de $1^m,45$ à $1^m,783$, et la dépense d'eau de 502 à 1089 litres par seconde, sans que le rendement ait varié sensiblement. Dans une expérience particulière, la turbine s'étant trouvée noyée de $0^m,17$, le rendement n'a plus été que de 62 p. 100 ; cependant, dans les expériences qui ont fourni 77 p. 100, la turbine était noyée de $0^m,01$ à $0^m,13$.

308. **Turbine double.** Fontaine-Baron a construit aussi une turbine double pour les cas où le volume d'eau varie dans les limites considérables. Elle est formée de deux séries bien distinctes d'aubes séparées par une couronne intermédiaire. Toutes les aubes et les trois couronnes sont fondues d'une seule pièce comme pour la turbine simple.

Il y a également deux séries de directrices fondues, comme les aubes, d'une seule pièce avec trois couronnes. Chacune des deux parties de la roue a un vannage semblable à celui d'une roue simple, et indépendant de celui de l'autre partie ; de sorte qu'on peut à volonté ne faire arriver l'eau que sur l'un ou sur l'autre compartiment, ou sur les deux à la fois, suivant le volume d'eau à débiter.

Au lieu de baisser les vannettes pour réduire le débit, ce qui diminue notablement l'effet utile, Fontaine a imaginé de fermer complètement un nombre plus ou moins grand de canaux distributeurs. A cet effet, il a employé deux troncs de cône reliés entre eux par un essieu traversé librement par l'arbre de la turbine ; ces troncs de cône roulent sur la surface annulaire comprenant les directrices, et y développent chacun une bande de cuir dont une extrémité est fixée à cette surface et l'autre au tronc de cône. On conçoit alors que selon qu'on fait tourner les troncs de cône dans un sens ou dans l'autre, les bandes de cuir découvrent ou couvrent un nombre voulu de canaux distributeurs.

Suivant une note communiquée par MM. Bethouard et F. Brault, successeurs de Fontaine et Brault : Les nombreuses applications des moteurs hydrauliques aux cas si variables que présentent les cours d'eau, ont amené ces industriels à faire des études complètes sur ces moteurs, et tout particulièrement sur la turbine Fontaine, qu'ils sont arrivés à perfectionner de façon à pouvoir l'appliquer avec avantage dans presque toutes les utilisations des forces hydrauliques.

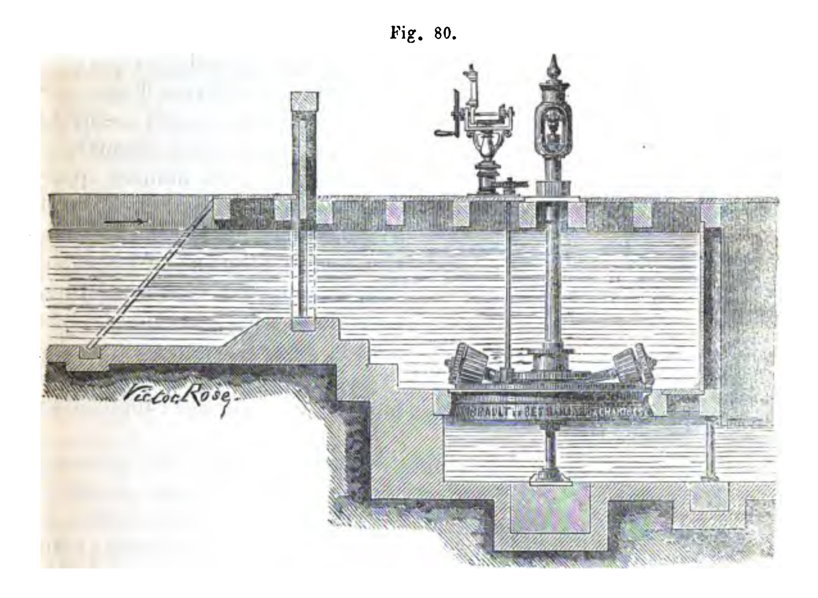
Suivant les hauteurs de chute et les variations dans le volume d'eau à utiliser, elle affecte différentes formes. Celle représentée par la figure 80 est la plus fréquente ; elle convient aux moyennes et aux plus basses chutes, avec des débits d'eau considérables, comme avec des plus faibles. Elle se compose principalement de quatre parties, savoir :

1° La turbine proprement dite ; 2° le distributeur ; 3° le pivot ; 4° le mécanisme de distribution de l'eau.

1° La turbine proprement dite, ou roue mobile, qui reçoit l'action motrice de l'eau, est formée par deux couronnes concentriques en fonte portant entre elles, sur toute l'étendue circonférencielle, des aubes

courbes à surface hélicoïdales, formant les orifices récepteurs (*fig.* 78); elle est fixée sur la partie inférieure d'un arbre vertical, qu'elle entraîne dans son mouvement de rotation.

Fig. 80.



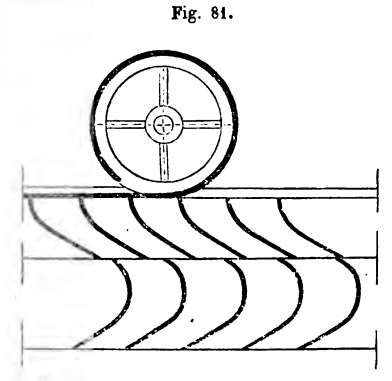
2° Le distributeur, ou roue fixe, est également formé par deux couronnes concentriques en fonte portant aussi sur toute l'étendue circonférencielle des aubes courbes à surface hélicoïdale. Ces aubes sont dirigées en sens inverse de celles de la roue mobile, et forment les orifices adducteurs (*fig.* 78 et 79). Le distributeur est placé exactement au-dessus de la turbine et forme le fond de la chambre d'eau d'amont.

3° Le pivot (système Arson), placé à la partie supérieure d'un arbre creux, en fonte, formant l'axe de la turbine, est supporté par une colonne en fer traversant l'arbre creux et allant se fixer dans une poêlette en fonte scellée dans le fond de la chambre d'eau. Cette disposition permet de visiter facilement le pivot ; le réservoir à huile qui l'entoure entretient le graissage.

4° Le mode de distribution de l'eau dans les orifices adducteurs est sans contredit l'une des parties les plus importantes de la turbine; c'est elle qui a subi le plus de transformations. Le système inventé par MM. Bethouard et F. Brault se compose (*fig.* 81) de deux bandes annulaires en gutta-percha fixées par une de leurs extrémités à deux parties diamétralement opposées de la surface supérieure des orifices adducteurs, l'autre extrémité est fixée à deux troncs de cône mobiles disposés pour tourner sur toute la surface annulaire du distributeur. Suivant le sens de rotation qu'on imprime à ces troncs de cône, ils enveloppent les deux bandes de gutta-percha, ou ils les développent sur toute la surface des orifices. Quand les bandes sont complète-

ment enroulées autour des troncs de cônes, tous les orifices adducteurs sont découverts, et quand, au contraire, elles sont entièrement déroulées, tous les orifices sont fermés.

Fig. 81.



Les qualités principales que possède cette distribution d'eau sont d'abord de pouvoir ouvrir ou fermer à volonté, par couples diamétralement opposés, un nombre quelconque d'orifices, tout en laissant complètement libres ceux qui restent ouverts, et qui, ne subissant aucune modification dans leur forme, permettent ainsi à la veine liquide qui les traverse d'agir exactement suivant le mode d'action de l'eau déterminé par les calculs; puis de produire une fermeture hermétique n'exigeant que peu de force pour sa manœuvre, ce qui permet l'application utile d'un régulateur.

Avec cette disposition, les turbines peuvent dépenser des volumes d'eau très variables, sans pour cela que le rendement varie sensiblement. Dans certains cas, quand les variations dans la chute et dans la dépense d'eau sont considérables, on construit la turbine double; mais tant que les variations ne dépassent pas le rapport de 3 à 1, on fait usage de la turbine simple.

Nous donnons ci-après les résultats des expériences :

VANNAGE.	DÉPENSE.	CHUTE totale.	TRAVAIL moteur, évalué par un déversoir.	NOMBRE de tours de la turbine par minute.	INDICATION donnée par le frein.	TRAVAIL DE LA TURBINE en km.	TRAVAIL DE LA TURBINE en chevaux.	RENDEMENT de la turbine.
	mèt cub.	mèt.	km.		kil.			
Tous les orifices ouverts.	2,090	1,40	2926	20,5	322	2107	28,1	0,72
	»	»	»	20	335	2138	28,5	0,73
La moitié des orifices ouverts.	1,045	1,40	1463	20,5	165	1079	14,4	0,737
	»	»	»	16	200	1021	13,6	0,698
Tous les orifices ouverts (*).	2,091	1,13	2363	28	165	1474	19,6	0,62
	»	»	»	19,5	245	1525	20,3	0,64

(*) Pour ces deux dernières expériences, on a établi en aval des turbines, dans le canal de fuite, un déversoir qui a permis d'évaluer la quantité d'eau réellement dépensée, et d'élever de $0^m,27$ le niveau des eaux d'aval. Le niveau d'amont n'ayant pas varié, la chute a été réduite ainsi à $1^m,13$ et la turbine complètement noyée.

309. Turbine Jonval. Perfectionnée par MM. A. Kœchlin et Ce, la turbine Jonval est encore du système de celle de Burdin (305). Elle est placée à la partie supérieure d'un cylindre en fonte rétréci et alésé au point où elle se trouve, de manière à l'envelopper exactement en ne laissant qu'un millimètre de jeu au plus. La partie contenant la couronne qui porte les directrices s'évase légèrement. A la partie inférieure et au-dessous du niveau d'aval, dont la variation est indifférente, le cylindre vertical s'adapte sur un tuyau rectangulaire horizontal muni d'une vanne qui permet de suspendre à volonté l'arrivée de l'eau. Cette vanne est la seule qui permette de faire varier la dépense de petites quantités.

La roue est ordinairement placée à une hauteur intermédiaire entre les niveaux d'amont et d'aval, de sorte que la pression de l'eau sur les aubes est due en partie à l'aspiration. Cette disposition permet de diminuer la longueur de l'arbre de la roue.

Lorsque la dépense d'eau est variable, mais constante pendant de certains laps de temps, on fixe à la couronne de la roue des coins obturateurs qui rétrécissent les canaux formés par les aubes. Pour une longueur d'aubes de 0^m,1154, mesurée suivant le rayon, les obturateurs d'une turbine ferment de 0^m,0674. On peut donc faire varier dans des limites très éloignées le débit de cette roue.

On a reconnu, par des expériences faites au Bouchet, par le général Morin, que l'effet utile que rend cette roue est les 0,72 du travail absolu du moteur quand tous les orifices sont complètement ouverts, qu'il est environ les 0,70 quand la moitié seulement des aubes sont garnies de leurs obturateurs, et encore les 0,63 quand toutes les aubes sont garnies de leurs obturateurs.

La vitesse à l'extérieur de la roue, correspondant au maximum d'effet, est les 0,70 de la vitesse $\sqrt{2gH}$ due à la chute totale H, et peut varier de 1/4 en plus ou en moins sans que le rendement soit sensiblement diminué.

Les constructeurs admettent les proportions suivantes :

18 pour le nombre des aubes ;
1/16 du diamètre extérieur D pour la plus courte distance de deux aubes consécutives ;
1/8D pour la longueur des aubes et des canaux qu'elles forment, mesurée suivant le rayon.

Connaissant la dépense Q ou le diamètre D, on calcule l'autre de ces quantités par la relation suivante, dans laquelle H est la chute totale :

$$D = \sqrt{\frac{14,2Q}{\sqrt{2gH}}}.$$

Pour de grandes dépenses d'eau, dans le but de diminuer D, on donne en général aux aubes une longueur égale à 6 ou 8 fois la plus courte distance de deux directrices consécutives à leur partie inférieure.

Les courbes directrices sont à peu près verticales à leur partie supérieure, et elles font un angle d'environ 34° avec l'horizon à leur partie

inférieure. Les aubes sont à peu près inclinées à 70° sur l'horizon à leur partie supérieure, et à 30° à leur partie inférieure.

Proportions de la turbine expérimentée au Bouchet :

Diamètre extérieur	0^m,810
Largeur des augets { sans obturateur	0 ,120
Largeur des augets { avec obturateur	0 ,048
Nombre des augets	18
Nombre des directrices	6
Plus courte distance entre deux courbes directrices à leur partie inférieure, prise sur la machine	0 ,112
Plus courte distance entre deux aubes consécutives, à leur partie inférieure	0 ,040
Section ou orifice de la roue	0^{mq},0706
Aire de l'orifice de la vanne de sortie	0 ,2977
La chute disponible a varié de	1^m,76 à 1^m,40

310. Divers perfectionnements apportés aux turbines. Plusieurs ingénieurs se sont occupés de l'établissement des turbines, et quelques-uns sont arrivés à des dispositions qui ont donné de bons résultats.

La turbine de Kraft est de ce nombre ; elle verse l'eau en dessous comme celle de Fontaine-Baron, dont elle diffère beaucoup plus dans les détails que dans l'ensemble. M. Kraft a aussi établi des turbines doubles pour obvier à de grandes variations de dépense d'eau. Des clapets, qui peuvent se rabattre sur toute la surface annulaire formée par les arêtes supérieures des directrices, permettent de supprimer à volonté le passage de l'eau par un plus ou moins grand nombre des canaux formés par les directrices, et par suite de modifier la puissance de la roue.

Des expériences faites sur une turbine Kraft, établie à Chevroz, dans le Doubs, ont donné un rendement de plus de 75 p. 100, à des vitesses très variables.

M. Charles Lombard a aussi donné une disposition de turbines versant l'eau en dessous. Des petites vannes partielles permettent de supprimer le passage de l'eau par le nombre voulu des canaux formés par les directrices.

L. D. Girard et Ch. Callon ont apporté aux turbines versant l'eau en dessous un perfectionnement qui ne manque ni d'originalité ni d'importance, et qui a fait donner au système la qualification d'*hydropneumatique*.

Ces ingénieurs, en foulant de l'air sous la turbine, y maintiennent l'eau au niveau de la surface inférieure mobile, quoique dans le canal de fuite l'eau s'élève à un niveau suffisant pour noyer la roue.

De cette disposition il résulte plusieurs avantages, dont le principal est qu'on peut n'ouvrir qu'un très petit nombre de vannes partielles, et par suite réduire considérablement le débit de la roue, sans que le rapport de l'effet utile au travail total soit sensiblement diminué. On conçoit que si la roue tournait dans l'eau, ce rapport diminuerait considérablement, puisque les résistances dues au mouvement de la roue restent à peu près les mêmes, quel que soit le débit de cette roue.

Les aubes, les directrices et les vannettes sont à très peu près disposées comme dans la turbine Fontaine (*fig.* 78); mais la partie supérieure de la tige de chaque vannette se recourbe à angle droit et porte un galet qui pénètre dans une rainure venue dans le pourtour d'un plateau circulaire mobile autour de l'axe de la roue. Cette rainure est à deux étages, qui se raccordent en deux points par une partie inclinée; un étage correspond aux vannettes fermées, l'autre aux vannettes ouvertes, et l'on conçoit qu'en tournant le plateau dans un sens ou dans l'autre, on puisse faire passer le bout courbé des tiges d'un étage à l'autre, et, par conséquent, ouvrir ou fermer successivement le nombre que l'on veut de vannettes.

Des expériences, faites par Girard et Callon sur une turbine hydropneumatique établie à la papeterie d'Égreville, ont montré que, selon que le nombre des vannettes ouvertes a varié de 10 à 30 sur le nombre total 40, l'effet de l'hydropneumatisation a varié de 25 à 9 p. 100.

D'autres expériences, faites sur une turbine hydropneumatique établie dans une papeterie de Troyes, ont montré que le nombre des vannettes ouvertes ayant varié de 10 à 32 sur le nombre total 38, et la puissance de 9,35 à 22,08 chevaux, l'effet utile a été de 0,77 sans variation bien sensible.

Ces résultats permettent donc de ne pas trop diminuer le diamètre des turbines, et par suite d'obtenir une vitesse de rotation non exagérée. C'est même pour atteindre ce but que Girard et Callon ont étudié une turbine dans laquelle il n'y a qu'un certain nombre de directrices divisées en deux groupes symétriques par rapport à l'axe de la roue. Un papillon ou double secteur mobile autour de cet axe permet de découvrir le nombre qu'on veut de canaux distributeurs. Le tuyau de chute amène l'eau dans une *bâche* ou cylindre en fonte dans laquelle se trouve la turbine. Le papillon est même préféré aux vannettes à tiges pour les turbines ordinaires; sa largeur est alors telle qu'il ne ferme que le nombre de canaux qu'exige la variation du débit.

La turbine Girard et Callon contenant autant de courbes directrices que d'aubes, la section normale des tuyaux *adducteurs* est moindre que celle des orifices récepteurs; d'où il résulte une libre déviation des veines liquides; ce qui est du meilleur effet dans une turbine hydropneumatique. De plus, les corps charriés s'arrêtent entre les directrices, d'où on les retire plus facilement que s'ils étaient descendus entre les aubes.

En outre, il existe aussi une autre turbine du système Haenel, dont les aubes sont munies d'une surépaisseur dans leur région médiane. L'angle de sortie et l'évasement de l'ambage sont variables, de telle manière que l'eau remplisse entièrement les conduits. Ces turbines peuvent marcher étant noyées, mais alors elles perdent l'avantage de la libre déviation.

Voici des données convenables qui résultent d'une longue pratique dans l'établissement des turbines à libre déviation, à vannage à soulèvements successifs.

311. *Tableau des proportions principales adoptées par Girard et Callon dans l'établissement des turbines à libre déviation et à vannages à soulèvements successifs.*

1er *type*, petites chutes et grands volumes; 2e *type*, intermédiaires; 3e *type*, fortes chutes et petits volumes, $\alpha = 16°$ à $17°$; $\beta = 20°$ à $21°$ (306).

	1er TYPE.	2e TYPE.	3e TYPE.
Nombre minimum $n = n'$ des courbes fixes et mobiles	40	40 ou mieux 48	40 ou mieux 52
Écartement $a = a'$ des courbes sur la circonférence moyenne	0^{m},20	0^{m},14	0^{m},10
Plus courte distance $a \sin \alpha - e$ à l'introduction	0^{m},044 à 0^{m},04	0^{m},028	0^{m},020
Plus courte distance $a' \sin \beta - e'$ à l'évacuation.	0^{m},065	»	»
Rapport maximum de l au diamètre moyen.	1/5	1/6	1/7
Rapport de l' à l.	1,25 à 1,33	»	»
Hauteur de la couronne fixe	0^{m},16	0^{m},14	0^{m},10
Hauteur h' de la couronne mobile ou roue.	0^{m},30	0^{m},245	0^{m},170

Girard a fait établir une turbine hydropneumatique fonctionnant sur une charge de 0^{m},45 à 0^{m},60 et dépensant de 3000 à 5000 litres d'eau par seconde; son diamètre est de 3^{m},50, et elle fait moyennement 20 tours par minute.

Une autre turbine établie par Girard, au Conservatoire des arts et métiers, a donné des résultats, certifiés par Morin et Tresca, qui se résument ainsi :

1° Pour des chutes qui ont varié de 4 à 12 mètres, et pour des dépenses d'eau de 4 à 15 litres par seconde, le rendement n'a jamais été inférieur à 0,65;

2° Ce rendement diminue avec l'ouverture de la vanne sans être jamais inférieur à 0,71 quand la vanne est entièrement ouverte;

3° Pour les chutes de 9 à 10 mètres, le rendement s'est élevé à 0,76. Cette turbine a fait 157 tours par minute sous la charge de 3^{m},88, et 360 sons celle de 12^{m},16. Elle avait été calculée pour une chute de 50 mètres et un débit de 30 litres par seconde.

312. Turbines versant l'eau latéralement. Théoriquement, ces roues ne diffèrent des précédentes qu'en ce que : 1° l'eau y coule horizontalement pendant son action au lieu de descendre de la hauteur h'; 2° les roues étant immergées dans le canal d'aval, l'eau remplit complètement les canaux, lesquels n'ayant pas une section uniforme sur toute leur longueur, on ne peut plus supposer que la pression est constante pour les molécules fluides, et que par conséquent celles-ci se meuvent comme si elles étaient indépendantes les unes des autres.

Ces turbines fonctionnent quand elles ne sont pas noyées; mais pour qu'elles utilisent toute la chute disponible, elles doivent, comme cela a lieu ordinairement, l'être complètement. Elles ont l'avantage de fonctionner quand elles sont noyées à une profondeur quelconque, et elles conviennent à toutes les chutes.

L'eau s'y meut horizontalement, d'où il résulte que la pesanteur ne modifie en rien ni le travail ni la vitesse de l'eau pendant que celle-ci est dans la roue; ce qui n'a pas lieu pour les turbines versant l'eau en dessous. L'effet de la force centrifuge est nul quand l'eau se meut verticalement, mais il n'en est pas ainsi dans le cas où l'eau se meut horizontalement.

Les considérations théoriques suivantes, qui sont de Bélanger, supposent que la vanne est levée de toute la distance des deux plateaux comprenant les aubes, c'est-à-dire que l'aube se meut sans changements brusques de vitesse, et qu'on néglige les frottements, les actions mutuelles du liquide et l'influence du jeu entre le vannage et la roue.

Soient (*fig.* 82) :

V la vitesse avec laquelle l'eau arrive au point A, représentée en grandeur et en direction par la droite AV, qui est dirigée suivant la tangente à la directrice E A;

v la vitesse de la roue au point A, origine de l'aube, représentée en grandeur et en direction par Av, qui est tangente à la circonférence intérieure de la roue au point A;

W la vitesse relative d'arrivée de l'eau sur le point A de l'aube; elle est représentée en grandeur et en direction par la résultante AW des deux vitesses V et v, cette dernière étant prise de A en B, c'est-à-dire en sens contraire du mouvement de la roue (*Int.* 1510). La direction AW est celle qu'on doit donner au premier élément de l'aube;

h la hauteur du bief d'amont au-dessus du point A, supposé à égale distance des plateaux;

p_1 la pression par mètre carré du liquide en ce même point A;

p la pression atmosphérique par mètre carré;

Π le poids du mètre cube d'eau;

W' la vitesse relative de l'eau au point C, extrémité de l'aube, par rapport à cette aube; elle est représentée en grandeur et en direction par la droite CW' dirigée suivant le dernier élément de l'aube;

v' la vitesse de la roue au point C; elle est représentée en grandeur et en direction par la droite Cv' tangente à la circonférence extérieure de la roue;

V' la vitesse absolue de l'eau à sa sortie de la roue; elle est représentée en grandeur et en direction par la résultante CV' des deux vitesses W' et v';

ω la vitesse angulaire; $\omega = \frac{v}{r} = \frac{v'}{R}$;

α l'angle que font entre elles les directions des deux vitesses V et v;

β l'angle que fait la direction de la vitesse W' avec la tangente à la circonférence extérieure de la roue au point C;

h' la hauteur du point C au-dessous du niveau du bief d'aval; la pression du liquide en C est $p + \Pi h'$;

$H = h - h'$ la chute totale ou la différence de niveau de l'eau en amont et en aval de la roue;

P le poids d'eau dépensé par seconde en kilogrammes;

Q le volume d'eau dépensé par seconde en mètres cubes;

r le rayon intérieur de la roue;

R le rayon extérieur de la roue;

l la hauteur de la roue, ou mieux la dimension verticale des orifices laissés entre les aubes;

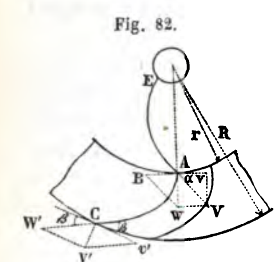
a la distance d'axe en axe de deux directrices consécutives, mesurée sur la circonférence intérieure de la roue;

a' la distance d'axe en axe de deux aubes consécutives, mesurée sur la circonférence extérieure de la roue;

d et d' les plus courtes distances entre deux courbes consécutives et entre deux aubes consécutives;

e et e' les épaisseurs de la tôle formant les courbes directrices et les aubes ;
n et n' les nombres des courbes directrices et d'aubes ;
k et k' les coefficients de contraction entre les directrices et les aubes ;
N le nombre de tours de la roue par minute.

Fig. 82.



On a, d'après Bernouilli :

$$\frac{V^2}{2g} = h + \frac{p - p_1}{\Pi}. \qquad (1)$$

$$W^2 = V^2 + v^2 - 2Vv \cos \alpha. \qquad (2)$$

Pour le cas où W est dirigée suivant le rayon de la roue, on a $v = V \cos \alpha$, et, par suite, $W^2 = V^2 - v^2$.

Une masse m de liquide passant du point A au point C :

1° L'accroissement de puissance vive est $\frac{1}{2} m (W'^2 - W^2)$;

2° La pression d'amont étant p_1, et celle d'aval $p + h'$, le travail dû à l'ensemble de ces pressions est $mg \left(\frac{p_1 - p}{\Pi} - h' \right)$;

3° Le travail de la force centrifuge est $\frac{1}{2} m\omega^2 (R^2 - r^2) = \frac{1}{2} m (v'^2 - v^2)$;

4° Le travail dû à la pesanteur est nul.

On a donc :

$$\frac{1}{2} m (W'^2 - W^2) = mg \left(\frac{p_1 - p}{\Pi} - h' \right) + \frac{1}{2} m (v'^2 - v^2),$$

ou

$$\frac{W'^2 - W^2 + v^2 - v'^2}{2g} = \frac{p_1 - p}{\Pi} - h'. \qquad (3)$$

v et v' étant proportionnelles aux rayons r et R, on a :

$$vR = v'r. \qquad (4)$$

Puisque la même quantité de liquide doit passer par les canaux formés par les courbes directrices et par ceux formés par les aubes, de l'incompressibilité du liquide et de la permanence du mouvement il résulte qu'on doit avoir, en supposant que le coefficient de contraction soit le même pour les premiers canaux que pour les seconds, et que de plus le rapport des épaisseurs des tôles aux passages libres soit le même pour les courbes directrices que pour les aubes :

$$Vr \sin \alpha = W'R \sin \beta. \qquad (5)$$

La condition du maximum de travail transmis à la roue conduit à faire β très petit, et alors on peut poser :

$$W' = v'. \qquad (6)$$

On a donc $\quad V'^2 = W'^2 + v'^2 - 2W'v' \cos \beta = 2v'^2 (1 - \cos \beta). \qquad (7)$

Des équations précédentes on peut tirer quelques conséquences : ajoutant les équations (1) et (3), on obtient, en faisant $W' = v'$ et $H = h - h'$:

$$\frac{V^2 + v^2 - W^2}{2g} = H. \qquad (8)$$

Remplaçant dans cette équation W^2 par sa valeur (2), on conclut :

$$\frac{Vv \cos \alpha}{g} = H. \qquad (9)$$

Multipliant membre à membre l'équation (4) par celle (5), et divisant membre à membre l'équation obtenue par l'équation (9), on obtient :

$$\frac{W'^2}{2g} \quad \text{ou} \quad \frac{v'^2}{2g} = \frac{1}{2} H \frac{\operatorname{tang} \alpha}{\sin \beta}, \qquad (10)$$

ce qui montre que les vitesses v' et W' sont indépendantes de h'.

Faisant $\alpha = 35°$ et $\beta = 25°$, on a :

$$\frac{W'^2}{2g} = \frac{v'^2}{2g} = \frac{1}{2} H \frac{0,7}{0,42}, \quad \text{d'où} \quad W' = v' = 0,92 \sqrt{2gH}.$$

Substituant dans l'équation (7) la valeur de v' tirée de l'équation (10), on conclut :

$$\frac{V'^2}{2g} = H \frac{\operatorname{tang} \alpha (1 - \cos \beta)}{\sin \beta}.$$

Le premier membre est la perte de chute due à la vitesse V' que conserve l'eau; le second membre indique cette perte en fonction de H. Pour les données précédentes, on a :

$$\frac{V'^2}{2g} = H \frac{0,7(1 - 0,91)}{0,42} = 0,15H.$$

Le travail $\mathcal{T}_m$ transmis à la roue est par conséquent les 0,85 de celui PH correspondant à la chute totale H, quelle que soit du reste la hauteur d'immersion h'.

Combinant les équations (4), (9) et (10), on conclut :

$$\frac{V^2}{2g} = H \left(\frac{R}{r}\right)^2 \frac{\sin \beta}{2 \sin \alpha \cos \alpha}.$$

Pour $\alpha = 35°$, $\beta = 25°$ et $\frac{R}{r} = 1,25$, on a :

$$\frac{V^2}{2g} = H \times 1,25^2 \frac{0,42}{2 \times 0,57 \times 0,82} = 0,70H, \text{ et } V = \sqrt{2g \times 0,70H} = 0,84 \sqrt{2gH}.$$

Le volume Q d'eau dépensé par une turbine est, selon qu'il s'agit des canaux directeurs ou des canaux formés par les aubes, et en se rappelant qu'on peut supposer $W' = v'$:

$$Q = kl(2\pi r \sin \alpha - ne)V, \qquad \text{et} \qquad Q = k'l(2\pi R \sin \beta - n'e')v'.$$

313. Turbines Fourneyron. Au lieu des valeurs précédentes du travail moteur $\mathcal{T}_m$, et des vitesses V et v', deux turbines Fourneyron ont donné au général Morin, la levée de la vanne étant à peu près égale à la distance des deux plateaux de la roue : l'une un travail maximum transmis égal aux 0,69 et l'autre aux 0,79 de la puissance absolue de la chute; $V = 0{,}75\sqrt{2gH}$ pour les deux turbines; enfin $v' = 0{,}81\sqrt{2gH}$ pour l'une, et $v' = 0{,}80\sqrt{2gH}$ pour l'autre.

Le rapport de l'effet utile d'une turbine à l'effet total dépensé diminue à mesure que la vanne s'abaisse au-dessous du point supérieur des aubes; c'est ce que confirme le tableau suivant des résultats obtenus par Morin, sur une turbine de 2 mètres de diamètre.

LEVÉE de la vanne.	HAUTEUR de chute.	DÉPENSE par seconde.	NOMBRE de tours par minute.	RAPPORT de $\mathcal{T}_m$ à PH.
m.	m.	m. cub.		
0,27	3,39	2,44	61,50	0,793
0,20	3,34	1,87	58,00	0,700
0,15	3,04	1,57	58,25	0,696
0,09	3,21	1,07	61,60	0,392
0,05	3,58	0,62	60,00	0,238

Dans la pratique :

$\frac{r}{R} = 0{,}75$ pour les chutes qui ne dépassent pas 2 mètres, 0,70 pour les chutes de 2 à 5 ou 6 mètres, et 0,65 pour les chutes supérieures;

$\alpha = 25°$ à $35°$, et $\beta = 20°$ à $25°$;

k varie de 0,90 à 0,95 selon que la hauteur l est grande ou petite;

$k' = 0{,}80$ pour les levées de vannes et vitesses normales de la turbine, et peut descendre à 0,75;

$\frac{n'}{n}$ varie de 1,33 à 1,50; le nombre n' est tel que la plus courte distance $a \sin\alpha - e$ de deux directrices consécutives n'excède pas $0^m{,}06$ pour des débits de 1 mètre cube à $1^{mc}{,}50$ par 1'', et il convient qu'elle soit moindre pour des dépenses plus petites.

La vitesse de l'eau dans le cylindre du vannage peut être, d'après Fourneyron, 1/5 de la vitesse due à la chute totale; on la fait ordinairement égale à $1^m{,}50$ et même plus, quoiqu'il serait convenable de la limiter à 1 mètre.

Application. Il s'agit d'établir une turbine Fourneyron à un cours d'eau dont le débit est $1^{mc}{,}50$ par seconde et la chute $H = 3$ mètres; ce qui correspond, en admettant un rendement de 0,65, à une force de 39 chevaux.

r' étant le rayon intérieur du cylindre du vannage, on a, en adoptant $1^m{,}50$ pour la vitesse dans ce cylindre :

$$3{,}1416 r'^2 \times 1{,}50 = 1{,}50, \qquad \text{d'où} \qquad r' = \sqrt{\frac{1}{3{,}1416}} = 0^m{,}564.$$

Ajoutant $0^m{,}030$ pour l'épaisseur du vannage et le jeu entre ce vannage

et la roue, on a :

$$r = 0^m,594, \quad R = \frac{0,594}{0,7} = 0,849 \quad \text{et} \quad R - r = 0^m,255.$$

Supposant d'abord que la plus courte distance d de deux courbes directrices soit $0^m,06$, on aura, en faisant $\alpha = 35°$ et $e = 0^m,005$, épaisseur au moins nécessaire pour une aussi forte turbine :

$$d + e = a \sin 35°, \quad \text{d'où} \quad a = \frac{0,065}{0,57} = 0^m,114.$$

Puis : $$n = \frac{2\pi r}{a} = \frac{2 \times 3,1416 \times 0,594}{0,114} = 32,73.$$

Adoptons $n = 33$, ce qui donne $n' = 44$ aubes.

Pour $n = 33$, on a : $$a = \frac{2\pi r}{n} = 0^m,113,$$

et $$d = a \sin 35° - e = 0,113 \times 0,57 - 0,005 = 0^m,059.$$

De l'équation $$Q = kl(2\pi r \sin \alpha - ne)V$$

on tire, en faisant $k = 0,90$ et $V = 0,75\sqrt{2gH} = 0,75 \times 7,672 = 5^m,75$.

$$l = \frac{Q}{k(2\pi r \sin \alpha - ne)V} = \frac{1,5}{0,90(3,73 \times 0,57 - 33 \times 0,005)5,75} = 0^m,147.$$

De l'équation relative aux aubes :

$$Q = k'l(2\pi R \sin \beta - n'e')v',$$

on tire, en faisant $l = 0^m,15$, $k' = 0,80$ et $v' = 0,80\sqrt{2gH} = 6^m,14$.

$$\sin \beta = \frac{Q}{2\pi R k' l v'} + \frac{n'e'}{2\pi R} = \frac{1,50}{5,334 \times 0,80 \times 0,15 \times 6,14} + \frac{44 \times 0,005}{5,334} = 0,422.$$

Sinus qui correspond à $\beta = 25°$.

Si l'on veut avoir la plus courte distance d' de deux aubes successives, on a d'abord :

$$a' = \frac{2\pi R}{44} = \frac{5,334}{44} = 0^m,121;$$

puis en faisant, comme pour les directrices, $e' = 0^m,005$,

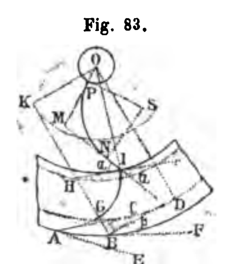
$$a' \sin \beta = d' + e', \text{ d'où } d' = a' \sin \beta - e' = 0,121 \times 0,422 - 0,005 = 0^m,046.$$

N étant le nombre de tours de la turbine, on a :

$$N = \frac{v' \times 60}{2\pi R} = \frac{0,80\sqrt{2gH} \times 60}{2\pi R} = \frac{6,14 \times 60}{5,334} = 69.$$

Pour tracer les aubes, on divise la circonférence extérieure de la roue en autant de parties égales qu'il y a d'aubes (*fig.* 83); des points de division A, B..., avec un rayon égal à a' sin β, on décrit des arcs de cercle; aux points A, B... on mène les droites AC, BD... faisant avec les tangentes AE, BF... des angles égaux à l'angle β; on mène le rayon BG perpendiculaire à BD, et du point H, pris sur BG prolongé, on décrit l'arc de cercle GI tangent à l'arc de rayon BG, et normal à la circonférence intérieure de la roue au point I. Le point H se détermine en menant par les différents points de GH des tangentes à la circonférence intérieure de la roue, et celui de ces points qui donne HI = HG est le centre de l'arc GI. Raccordant ensuite l'arc IG avec l'arc de rayon BG et la droite AC, on obtient la courbe IGA qui est la section horizontale de l'aube. On trace de même toutes les aubes; mais on facilite cette opération en remarquant que toutes les droites analogues à BH sont tangentes à une même circonférence décrite du centre O de la roue, avec un rayon égal à la perpendiculaire OK abaissée sur le prolongement de BH, et en remarquant aussi que toutes les droites analogues à AC et BD sont tangentes à la circonférence décrite avec la perpendiculaire OD pour rayon. Tous les points analogues à H se trouvent sur une même circonférence dont le centre est celui de la roue.

Fig. 83.



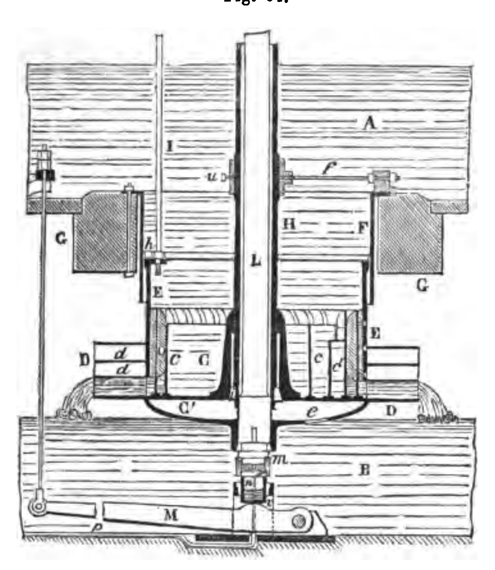
Pour tracer les courbes directrices, on mène (*fig.* 83) la droite IM faisant l'angle α avec la tangente IH à la circonférence intérieure de la roue; on mène ensuite la droite OM faisant l'angle IOM = OIM; on prend IN égal au rayon extérieur OP du tube qui enveloppe l'arbre de la roue; on élève les perpendiculaires PS, NS, et de leur point de rencontre S avec le rayon SP = SN, on décrit l'arc de cercle PN, qui forme, avec la partie droite NI, la coupe horizontale de la directrice.

Pour la facilité des assemblages, quelquefois la moitié des directrices, qui sont en nombre pair, ne s'étendent que de la circonférence intérieure de la roue à la moitié du rayon de cette circonférence.

La figure 84 représente, à l'échelle de 1/40, la coupe par l'axe d'une des quatre turbines Fourneyron construites à l'ancien moulin à l'anglaise de Saint-Maur, près Paris, et commandant chacune dix paires de meules.

A bief supérieur;
B canal de fuite;
C espace dans lequel se trouvent les courbes directrices;
c douze courbes directrices partant du moyeu et ayant 0m,36 de hauteur;
c' douze courbes directrices partant du milieu de l'espace annulaire C, et ayant 0m,30 de hauteur;
C'. plateau fixe portant les directrices *c*, *c'*; il porte un moyeu très élevé qui s'assemble sur le tuyau en fonte H;
i bague en fer tournée; elle est formée de deux morceaux, et sert à fixer le plateau C' sur le tuyau H; en soulevant le plateau, on enlève la bague et l'on descend le plateau;
D roue proprement dite, contenant 30 aubes de 0m,27 de hauteur;
e disque servant de bras à la roue. Il est percé de quatre roues qui permettent de

Fig. 84.



retirer les objets qui peuvent pénétrer dans les compartiments; son moyeu se fixe sur l'arbre à l'aide d'une bague en fer semblable à celle *i*;

d, *d* cloisons horizontales en tôle divisant la hauteur de la roue; le disque qui termine supérieurement la roue est également en tôle;

E vanne; c'est un cylindre en fonte, dont le diamètre extérieur est exactement égal au diamètre intérieur de la roue;

O coins en bois vissés contre le cylindre E. Leur forme est celle des canaux compris entre les directrices, qu'ils ferment quand on baisse la vanne. On a soin de les arrondir supérieurement et inférieurement, afin de diminuer la contraction des veines fluides, qui est d'autant plus grande que la vanne est plus rapprochée du plateau C'. Leur longueur, mesurée horizontalement et suivant la direction des canaux dans lesquels ils glissent, est de $0^{m},25$ environ;

h garniture formée d'un cuir recourbé, empêchant l'eau de s'échapper entre le cylindre E et le tuyau de retenue en fonte F;

I trois tiges servant à manœuvrer la vanne; elles pénètrent chacune dans le moyeu à écrou d'un pignon; une roue d'engrenage folle sur l'arbre L permet de faire tourner simultanément les trois pignons, et par suite de manœuvrer la vanne;

G charpente à laquelle est fixé le système;

H cylindre en fonte enveloppant l'arbre de la turbine, et auquel est fixé le plateau C' qui porte les directrices; il s'élève jusqu'au-dessus du niveau de l'eau, où il se fixe soit à une charpente, soit à une pièce de fonte;

f trois fortes tiges reliant un manchon en fonte qui entoure le cylindre H à la charpente G. Des vis *u* servent à centrer le cylindre H et à le fixer au manchon; cette précaution est nécessaire lorsque, comme dans ce cas, la hauteur est grande;

u vis fixant le cylindre H et le maintenant dans la position verticale;

L arbre moteur en fonte;

n pointe en acier fixée sur deux petites clefs dans une crapaudine en cuivre, dans laquelle arrive un filet d'huile; sur la tête de cette pointe tourne un grain d'acier dont est garni le bas de l'arbre L; ce grain est représenté coupé dans la figure. La pointe *n* est garnie de saignées latérales qui amènent l'huile sur toute la surface frottante;

m bague fixée au bas de l'arbre; elle sert à retenir l'huile et à maintenir l'arbre sur le pivot *n*. Sans cette disposition, les matières onctueuses seraient obligées de s'élever pour venir entre les surfaces frottantes;
v chaise sur laquelle repose la crapaudine: deux petites clefs y fixent celle-ci de manière à l'empêcher de tourner, tout en lui permettant de se soulever;
M fort levier de $2^m,57$ d'une articulation à l'autre, servant à maintenir le système mobile à une hauteur convenable;
p tube communiquant au-dessus du sol de l'usine, et amenant l'huile dans la crapaudine.

MACHINES A ÉLEVER L'EAU

314. Machines à colonne d'eau. Dans ces machines, l'eau est employée comme force motrice, et, agissant à la manière de la vapeur dans un cylindre de machine à vapeur, elle communique un mouvement de va-et-vient rectiligne à un piston. Ces machines, qui peuvent être à double ou à simple effet, conviennent surtout quand on dispose d'une grande chute et d'un petit volume d'eau.

La plus ancienne machine à colonne d'eau fut établie, en 1731, par Denisard et de la Deuille (*Recueil de machines approuvées par l'Académie des sciences*, t. V). Elle avait pour objet d'élever à une certaine hauteur une partie de l'eau de la chute motrice. Bélidor imagina, de 1736 à 1739, une machine analogue, dont il donne la description dans son *Architecture hydraulique*, mais qui ne fut pas exécutée. Elle fut imitée dix ans plus tard par Hoëll, dans les mines de Schemnitz (Hongrie). Ces machines sont toutes à simple effet. L'une des premières machines à double effet est celle qui fut construite à Rosenheim (Bavière), par de Reichenbach, ingénieur bavarois, pour l'extraction des eaux du puits salé de Reichenhall.

Les machines à colonne d'eau, employées en plusieurs endroits pour l'épuisement des mines, communiquent le mouvement à des pompes, soit directement, soit par l'intermédiaire d'un balancier, dont les bras sont inégaux, afin de diminuer la course des pistons des pompes.

L'effet utile rendu par ces machines, c'est-à-dire le produit du poids d'eau élevé par la hauteur d'élévation, peut être exprimé par :

$$\mathcal{T}_u = k\text{PH}.$$

P poids d'eau dépensé;
H hauteur de chute;
PH effet total dépensé;
k coefficient, qui provient du frottement de l'eau dans les tuyaux et le corps de pompe et de celui des pistons et autres organes de la machine; des changements de direction et de vitesse de l'eau; de la vitesse que conserve l'eau motrice en sortant du tuyau d'évacuation et de celle que conserve l'eau élevée en sortant du tuyau ascensionnel, etc.

Les anciennes machines, dites *de Hoëll*, employées aux épuisements des mines de Hongrie, ont donné les résultats du tableau suivant, que nous extrayons du *Traité des machines* de Hachette.

HAUTEUR des sources.	DIAMÈTRES des pistons.	EAU dépensée en 24 heures.	HAUTEUR d'élévation de l'eau.	EAU élevée en 24 heures.	RAPPORT de l'effet utile à l'effet dépensé.
m.	m.	m. cub.	m.	m. cub.	
83,757	0,351	1900,328	89,656	817,036	0,45
89,656	0,325	2467,965	214,290	479,879	0,46
79,910	*id.*	685,550	46,777	394,185	0,33
79,910	*id.*	582,711	28,585	589,566	0,36
89,656	*id.*	2467,965	66,267	1336,815	0,40

Le diamètre du tuyau de chute de la première machine de ce tableau est de 0m,162. La course du piston est de 1m,95, et il s'élève et s'abaisse environ sept fois par minute.

Dans les machines établies dans les mines de Hongrie, du Hartz, etc., l'effet utile est plus considérable que ne l'indique le tableau précédent, et des machines établies à Freyberg, en Saxe, ont donné un effet utile égal à 0,70PH, et même 0,75PH quand les pompes mues par les machines travaillaient avec toute l'eau qu'elles pouvaient contenir.

L'extrait suivant d'un mémoire publié par Juncker, dans les *Annales des mines* (t. VIII, 1835), montre l'importance que peut avoir la machine à colonne d'eau dans l'exploitation de quelques mines.

La mine de plomb et d'argent d'Huelgoat (Finistère), partie de la concession de Poullaouen, renferme des sources abondantes d'une eau vitriolique. Le gîte du minerai se trouve disposé de manière à rendre les opérations d'épuisement très compliquées; mais comme le pays est sillonné en tous sens par des vallons où coulent des ruisseaux qui, à l'aide de canaux de dérivation, ont pu être conduits jusqu'au coteau dans lequel s'enfonce le filon métallique, il a été possible de créer sur ce point de grandes chutes d'eau, et même d'en augmenter la hauteur utile par le percement de longues galeries d'écoulement partant du centre des travaux et débouchant dans la vallée voisine. La force motrice qu'on s'est ainsi procurée varie avec les saisons; sa valeur moyenne équivaut, par minute, à 23 mètres cubes d'eau tombant de 66 mètres; ce qui correspond à une puissance théorique de 337 chevaux-vapeur, dont une notable partie était employée à la préparation mécanique du minerai, et une autre partie plus considérable était perdue par suite de vices dans la distribution et le morcellement des chutes, ou par des pentes exagérées dans les aqueducs et les coursiers.

Cette puissance motrice, dans l'ancien système d'épuisement d'Huelgoat, mettait en jeu des roues hydrauliques échelonnées les unes au-dessus des autres sur le flanc de la montagne où la mine est située; les roues, à leur tour, transmettaient le mouvement à trois *machines à tirants*. Ces machines, malgré leur belle exécution, ne rendaient qu'un effet utile de 20 p. 100 de la force motrice, et leur entretien annuel ne coûtait pas moins de 40000 francs. Ajoutons qu'en 1816, après une dépense de plus de 120000 francs, les trois machines réunies ne suffisaient

plus à l'épuisement des sources; les eaux envahissaient graduellement les travaux, et l'on pouvait calculer l'époque où ce bel établissement serait inévitablement abandonné.

Juncker proposa à la compagnie de Poullaouen de renoncer entièrement aux impuissants moyens mécaniques dont elle faisait usage, et de les remplacer par des machines à colonne d'eau. Après quelques hésitations des actionnaires, la proposition fut agréée, et Juncker se rendit en Bavière pour y voir fonctionner des machines de cette espèce, construites sous la direction de Reichenbach.

La Bavière, en 1822, produisait annuellement 750000 quintaux de sel. Une partie provenait des sources et était extraite par voie d'évaporation à l'aide des moyens connus; l'autre, tirée d'abord d'une mine située dans la vallée de Berchtesgaden, était transportée à Reichenhall, où elle subissait une purification par dissolution. Mais le transport de ce sel gemme, quoique plus avantageux que ne l'aurait été celui du combustible dans la vallée étroite et peu boisée de Berchtesgaden, était cependant fort coûteux. D'après les idées de Reichenbach, ce système fut entièrement abandonné; c'est à l'état liquide, dans des tuyaux de conduite, et après avoir été convenablement élevé à l'aide de deux puissantes machines à colonne d'eau, que le sel est maintenant expédié par delà les montagnes abruptes, dernières ramifications des Alpes tyroliennes, qui séparent Berchtesgaden de Reichenhall. Ainsi le bois, qui ne peut être rendu liquide, ne va plus chercher le sel; c'est, au contraire, le sel qui marche de lui-même à la rencontre du bois. Dans son trajet, l'eau salée est élevée de 1035 mètres en quatorze reprises différentes, au moyen d'un égal nombre de pompes foulantes mues par neuf machines à colonne d'eau et cinq roues à augets; l'une de ces premières machines, celle d'Illsang, marche sous l'action d'une chute d'eau de $109^{m},21$, et refoule l'eau salée, d'un seul jet, à une hauteur verticale de $355^{m},66$; la conduite parcourue par la dissolution saline, entre la source et le point où l'évaporation s'opère, offre un développement de tuyaux d'une longueur de 109164 mètres; enfin sur divers points l'effet utile atteint 72 p. 100 de la force motrice.

La supériorité de ce rendement sur celui que les ingénieurs Hoëll et Winterschmidt ont obtenu avec les anciennes machines à colonne d'eau, doit être attribuée aux diverses innovations de Reichenbach, dont les principales sont rangées dans l'ordre suivant par Juncker :

1° L'adoption d'un régulateur à piston, tellement construit que les colonnes d'eau se meuvent et s'arrêtent sans chocs appréciables;

2° L'idée d'emprunter à la colonne d'eau motrice la force nécessaire pour faire agir ce régulateur avec une précision presque mathématique;

3° L'emploi d'orifices d'admission et d'émission fort grandes, de telle sorte que la veine fluide n'éprouve plus ni contraction ni vitesses excessives;

4° La disposition qui permet de faire agir directement la puissance sur la résistance sans aucun intermédiaire de balanciers, leviers coudés, etc.;

5° La substitution, quelle que soit la hauteur de la colonne de refoulement, d'une pompe unique à la multitude de pompes placées à divers étages dont on se servait.

L'examen minutieux de tant d'ingénieuses conceptions devait, de plus

en plus, confirmer Juncker dans sa première pensée que les machines à colonne d'eau pouvaient seules sauver les mines d'Huelgoat de la submersion complète dont elles étaient menacées; aussi se décida-t-il à prendre irrévocablement pour guide les travaux de Reichenbach. Mais on se fera une idée des immenses difficultés que Juncker eut encore à vaincre, si l'on songe que la machine d'Huelgoat a une puissance prodigieuse, double au moins de celle de la machine d'Illsang, citée ci-dessus. En Bavière, tout se trouve établi au grand jour, dans un espace indéfini, sur un terrain solide; à Huelgoat, au contraire, la machine, la pompe, les tuyaux sont placés ou plutôt suspendus dans un puits resserré et très profond, le long duquel se rencontrent fréquemment des couches *ébouleuses*. Dans les établissements bavarois, l'appareil moteur est placé immédiatement au-dessus de la pompe foulante des eaux salines. En Bretagne, ces deux parties de l'appareil ne pouvant être que fort éloignées verticalement, il a fallu pourvoir à l'équilibration des tiges très longues, et dès lors très pesantes, destinées à les réunir.

Comme une machine, quelque soignée que soit sa construction, peut se déranger tôt ou tard, Juncker jugea utile d'adopter deux machines pouvant marcher en même temps, sans être solidaires. Il donna de plus la préférence aux machines à simple effet, parce que leur mécanisme est moins compliqué; qu'elles sont plus faciles à établir et à maintenir dans un état parfait de stabilité, les efforts se produisant dans un seul sens; que les cylindres étant ouverts supérieurement, cela permet de visiter et graisser facilement le piston, et d'apercevoir les moindres fuites. Au surplus, les garnitures de cuir durent fort longtemps sous la salutaire influence d'un parfait graissage; c'est ainsi que le premier cuir, quoique marchant dans un cylindre neuf, a fonctionné pendant plus de trois ans, sous une pression de $7^{atm},5$, sans laisser passer une goutte d'eau.

Le système adopté par Juncker imposait la nécessité de suspendre l'appareil moteur dans le vide d'un puits de 330 mètres de profondeur, à 230 mètres du fond. Le pont en fonte jeté en travers du puits, et sur lequel reposent les deux cylindres moteurs et leurs accessoires, offre une si parfaite solidité, que la main n'y peut découvrir le moindre *frémissement*, même à l'instant où les pistons commencent à recevoir l'impulsion de l'eau motrice.

La figure 85 représente, au 1/50, la coupe verticale de l'appareil moteur de la machine à colonne d'eau d'Huelgoat:

Y cylindre principal, ouvert à sa partie supérieure;

P piston moteur ;

X tige du piston, traversant le fond du cylindre par un stuffing-box, et se prolongeant jusqu'au fond du puits où elle commande directement le piston de la pompe élévatoire;

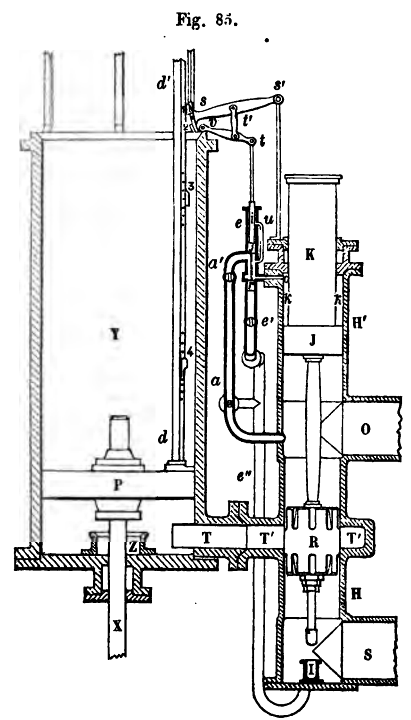
O tuyau d'arrivée ou de chute;

S tuyau d'évacuation;

HH' deuxième cylindre, dans lequel débouchent les tuyaux O et S;

T tubulure rectangulaire de communication entre les cylindres Y et HH';

Fig. 85.



R piston distributeur et régulateur. Dès qu'en *descendant* il commence à découvrir la tubulure T (ce qu'indique la fig. 85), le tuyau d'admission O se met en communication avec le bas du cylindre Y, et le piston P, qui est au bas de sa course, commence son ascension. Au contraire, dès qu'en *remontant* le piston R recommence à découvrir la tubulure T, le tuyau d'émission S se met en communication avec le bas du cylindre Y, et le piston P, qui était arrivé au sommet de sa course, commence à descendre, en foulant dans le tuyau S l'eau qui remplit le cylindre Y.

Le piston R est un cylindre creux en bronze, assez parfaitement tourné et rodé pour pouvoir fonctionner sans garniture. Au milieu, sur une hauteur un peu plus grande que celle de la tubulure T, la surface extérieure du piston R est pleine et unie; mais à chacun de ses bouts, sur le reste de sa hauteur, il présente huit cannelures en forme de coin, dont les têtes sont réparties uniformément sur le pourtour de chacune des bases du piston. Les huit cannelures du haut rendent progressive l'arrivée de l'eau motrice sous le piston P au commencement de la course ascendante de ce piston, et suppriment progressivement l'entrée de cette eau quand ce même piston arrive vers le sommet de sa course. Les huit cannelures du bas produisent le même effet pour la sortie de l'eau qui remplit le cylindre Y, quand le piston P commence à descendre, et quand il arrive vers le bas de sa course. Par cette disposition du piston régulateur R, on évite tout changement brusque de direction et de vitesse des parties mobiles solides et liquides; ce qui est très favorable à la conservation de la machine et à l'effet utile rendu.

Afin que les pressions de l'eau sur la surface latérale du piston R se fassent constamment équilibre, et n'engendrent pas des frottements latéraux nuisibles à la mobilité de ce piston, la tubulure T se prolonge tout autour de celui-ci, comme on le voit en T'. La largeur de la tubulure T est égale au diamètre du piston R, plus deux fois la largeur de T'.

La hauteur totale du piston R est au moins égale à trois fois la hauteur de la tubulure T.

J piston relié par une tige rigide au piston régulateur R. Ces pistons ont rigoureusement leurs axes en ligne droite, et ils prennent les mêmes mouvements. L'un et l'autre laissent toujours entièrement à découvert l'ouverture du tuyau O, de sorte que la colonne de chute agit constamment à pleine pression sur la face supérieure du piston R et sous la face inférieure du piston J.

K cylindre fixé sur la face supérieure du piston J.

k espace annulaire séparant le cylindre K de la paroi intérieure du cylindre H'. Cet espace peut communiquer avec le tuyau de chute O, ou avec celui d'émission S.

Le diamètre du piston R étant moindre que celui du piston J et plus grand que celui du cylindre K, quand la couronne *k* communique avec le tuyau de chute O, la pression sur le piston R, plus la pression sur la base de la couronne *k*, moins la pression sous le piston J, suffit pour faire descendre l'ensemble RJK, qui est en outre sollicité de haut en bas par son poids, et en sens contraire par les frottements de cet ensemble et par la pression de la colonne d'évacuation S sous le piston R. (On se rappelle que l'eau est foulée à 14^m,20 de hauteur, par le tuyau S, dans la galerie d'écoulement) Quand, au contraire, l'espace annulaire *k* communique avec le tuyau S, et que par suite la pression y est relativement faible, la pression sous le piston J, moins la pression sur le piston R, suffit pour faire remonter l'ensemble RJK et faire sortir l'eau de la couronne *k*.

Ainsi, en établissant alternativement et en temps opportun la communication de la couronne *k* avec le tuyau de chute O et avec celui d'évacuation S, l'ensemble RJK descend, puis remonte, et de l'oscillation du piston R du dessus au dessous et du dessous au dessus de la tubulure T résultent les montées et les descentes successives du piston moteur P.

ee' cylindre vertical communiquant avec l'espace annulaire *k* par la tubulure *o*, avec le tuyau de chute O par le tube *a*, et avec le tuyau d'évacuation S par le tube *e''*.

rji ensemble analogue à celui RJK, et établi d'après le même principe.

La pression de la colonne de chute se transmet d'une manière permanente par le tube *a* entre les pistons *r* et *j*, et ne tend nullement à mettre en mouvement l'ensemble *rjk*, les pistons *r* et *j* ayant ici le même diamètre.

Le tuyau d'émission S refoulant l'eau dans la galerie d'écoulement située à 14^m,20 au-dessus du cylindre Y, il en résulte une pression d'environ 30 kilogrammes qui agit sous le piston *r*. On fait équilibre à cette pression en mettant en communication, d'une manière permanente, la colonne de chute O avec l'espace annulaire qui entoure le cylindre *i*. A cet effet, un tube *u* ouvre dans cet espace annulaire et dans l'intervalle des pistons *r* et *j*.

L'ensemble *rji* n'offre alors qu'une très faible résistance à son mou-

vement, soit de descente, soit de montée; mais sans pouvoir prendre aucun mouvement sous l'influence des pressions qu'il reçoit du liquide.

Selon que le piston *r* est au-dessous ou au-dessus de la tubulure *o*, l'espace annulaire *k* communique avec le tuyau d'admission O ou avec celui d'émission S, le piston régulateur R descend ou monte, et le piston moteur P monte ou descend. Il s'agit donc, pour assurer le mouvement régulier de la machine, de faire venir à des instants convenables le piston *r* au-dessous, puis au-dessus de la tubulure *o*, et l'on conçoit que c'est le piston moteur Y qui doit produire ce déplacement.

tv levier articulé en *v* et à l'extrémité *t* duquel est suspendu l'ensemble *rji*.

ss' second levier ayant son axe en *s'*, et relié au précédent *tv* par la bielle articulée *t'*.

1 et 2 mentonnets fixés à un secteur que porte l'extrémité *s* du levier *ss'*, l'un contre une face latérale de ce secteur et l'autre contre la face opposée.

dd' tige en fer fixée au piston moteur P, et se mouvant en restant tangente au secteur 1, 2.

3 et 4 cames fixées en position inverse et au moyen de vis sur les deux faces opposées de la tringle *dd'*, qui, à cet effet, porte une série de trous, à l'aide desquels on peut faire varier la distance d'une came à l'autre, et, par suite, faire varier la course du piston moteur. Les cames 3 et 4 correspondent d'ailleurs respectivement au mentonnets 1 et 2 du secteur.

Lorsque le piston moteur P, obéissant à la pression de l'eau motrice, s'élève dans son cylindre avec la tige *dd'*, la came 3 rencontrant le mentonnet 1 l'entraîne avec elle et fait monter l'ensemble *rji*. Mais bientôt, par suite de son mouvement angulaire, le mentonnet 1 échappe à la came 3, et le piston P achève sa course pendant que la régulation ascendante s'opère pour fermer le tuyau d'admission O et favoriser l'émission.

Un instant après, le piston P redescend; mais, cette fois, la came 3 ne rencontre plus le mentonnet 1, qui, après son échappement, est demeuré immobile. C'est au contraire la came 4 qui accroche le mentonnet 2, lequel s'était avancé vers la tringle *dd'* pendant que le mentonnet 1 s'en était éloigné. Le secteur redescend, et avec lui les petits pistons *r* et *j*, qui viennent reprendre la position indiquée par la figure 85. A ce moment il y a nouvel échappement, et le piston P continue à descendre jusqu'à la limite inférieure de sa course, pendant que s'effectue la régulation qui a pour objet de le mettre de nouveau en rapport avec la colonne de chute, et lui faire commencer une nouvelle pulsation.

Pour modérer ou accélérer autant qu'on veut la vitesse du piston régulateur R, *et par suite faire varier à volonté et avec une rare précision la course du piston moteur* P *pour une même position des cames* 3 *et* 4, on a recours à deux robinets modérateurs, dont l'un *a'* est placé sur le tube *a* qui donne accès à l'eau motrice dans l'espace annulaire *k*, et

l'autre e' sur le tube e qui permet l'évacuation de l'eau qui remplit cet espace annulaire. Ces robinets fournissent aussi un moyen facile d'arrêter la machine : quand, en effet, le piston R est au milieu de sa course ascensionnelle, et que sa partie non cannelée se trouve bien en regard de la tubulure T, il suffit de fermer le robinet e' pour faire cesser instantanément tout mouvement dans la machine, que l'on remettra en marche avec autant de facilité en rouvrant le même robinet. On obtient un résultat semblable dans la marche opposée du piston R en manœuvrant le robinet a'.

Comme nous l'avons dit, on peut faire varier la course du piston moteur P, soit en changeant la distance qui sépare les cames 3 et 4 fixées sur la tige dd', soit, ce qui est préférable, en modifiant la vitesse de la régulation au moyen des robinets e' et a'. De la vitesse du piston régulateur R dépend la vitesse du piston moteur P ; mais, afin de se rendre parfaitement maître du jeu de la machine, on a placé dans le tuyau O une valve circulaire, à l'aide de laquelle on règle la vitesse d'arrivée de l'eau motrice, et par suite la vitesse ascensionnelle du piston P ; une valve semblable placée dans le tuyau S permet de même de régler la vitesse de descente du piston P. On est ainsi maître du nombre des pulsations de ce piston dans un temps donné.

I godet toujours plein d'eau, dans lequel vient s'engager le bout d'une béquille fixée sous le piston R. L'eau qui s'échappe avec peine du godet I, tout autour du bout de la béquille, devient un obstacle assez grand pour amortir sans choc le mouvement de descente du régulateur. Un coussin en liège, maintenu par une potence à l'extérieur et au-dessus du cylindre HH', limite de même sans choc la montée du régulateur.

Z cuvette produisant pour le piston moteur P le même effet que le godet I pour le régulateur. Le piston P doit, quand il est au bas de sa course, laisser entièrement libre l'entrée de la tubulure T.

Les dispositions indiquées dans les deux paragraphes précédents sont plutôt des mesures de prudence que de nécessité absolue ; en Bavière on n'y a pas eu recours.

Si la tige d'une pompe venait à se briser, le piston P, soumis à l'action de la colonne de chute, serait soulevé jusque hors du cylindre. Pour éviter tout accident, le cylindre se continue à la partie supérieure par une espèce de cage formée de six montants en fer reliés entre eux vers le haut par un cercle de même métal. Dès que le bas du piston dépasse le bord supérieur du cylindre, l'eau s'échappe latéralement entre les barreaux de la cage, et bientôt le piston cesse de monter dans celle-ci, qui lui sert de guide.

En cas de rupture, les tiges restent suspendues à des arrêts en nombre suffisant, qui les empêchent de tomber avec violence au fond du puits.

Les garnitures des pistons et des *stuffing-box* sont en général formées de rondelles de cuir posées à plat, et accompagnées d'une autre qui est emboutie et forme fermeture autoclave. Le cuir de ces rondelles a reçu la forme voulue, en le soumettant à une forte compression entre des

moules particuliers, après l'avoir toutefois ramolli dans l'eau ; ensuite, avant de le mettre en travail, on l'a fortement imprégné d'huile animale, qui a le double objet de lui faire conserver une certaine raideur dans son contact avec l'eau et d'adoucir les frottements.

Ces sortes de garnitures, excellentes sous le rapport de l'imperméabilité, durent extrêmement longtemps, surtout lorsqu'il est possible d'entretenir constamment les pièces contre lesquelles elles frottent, d'un enduit gras, obtenu par le mélange intime fait à feu doux de 6 parties de saindoux, 5 de suif et 1 d'huile d'olive ou d'huile de pied de bœuf. La consistance de ce mélange refroidi doit être celle du miel.

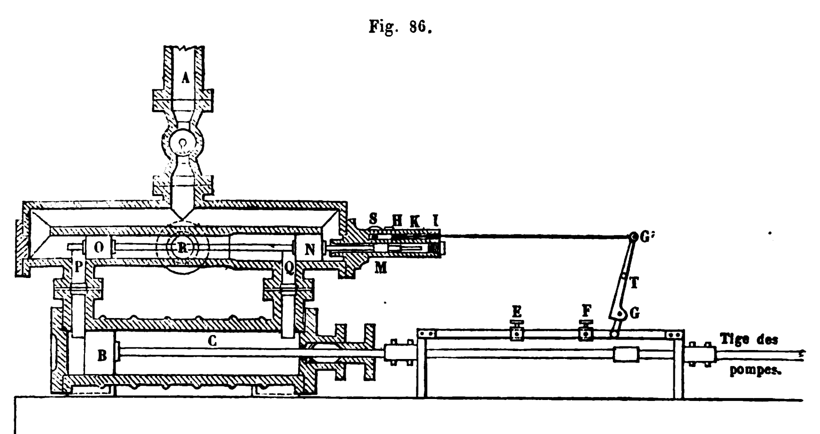
La conduite et l'entretien, qui coûtaient annuellement 40 000 francs pour les anciennes machines, ne reviennent qu'à 5 000 francs avec les machines à colonne d'eau.

Le mode d'épuisement d'Huelgoat, totalement renouvelé et s'étendant à la profondeur considérable de 230 mètres sous la galerie d'écoulement, ou à 330 mètres du jour, a occasionné une dépense de 368 611 francs.

315. Machine à colonne d'eau des salines de Saint-Nicolas-Varangéville (Meurthe-et-Moselle). M. Pfetsch, directeur, a fait établir une machine à colonne d'eau du système de Reichenbach, mais horizontale et à double effet. Elle a été construite à Bar-le-Duc, dans les ateliers de M. Dyckhoff. (*Annales des mines*, 1860.)

La figure 86, qui représente la coupe verticale par l'axe de la machine, permet de suivre facilement le mode de fonctionnement de cette machine, surtout si l'on a bien compris comment fonctionne la machine d'Huelgoat.

Fig. 86.



Dans la position actuelle des pistons régulateurs O et N, l'eau de la colonne de chute A vient par la tubulure P presser le piston moteur B de gauche à droite. La tige C se meut vers la droite avec le piston B, auquel elle est fixée, et pousse le piston de la pompe.

Deux cames ou curseurs E, F fixés sur une tringle qui obéit au mou-

vement de va-et-vient de la tige de la pompe servent à régler la course de la machine.

Dans son mouvement de gauche à droite, la came E rencontre l'extrémité de la branche inférieure du levier GG', lequel se trouve entraîné et change la position des petits pistons H et I, de manière à amener le piston H à gauche de la tubulure qui établit la communication entre le cylindre parcouru par les pistons H et I, et celui qui contient le piston M. Aussitôt l'eau de chute, qui, par l'ouverture K, a toujours accès entre les deux pistons H et I, vient presser sur le piston M, et le porter de droite à gauche, ainsi que les pistons N et O, ces trois pistons étant reliés entre eux par une tige commune.

Ce déplacement des pistons M, N, O ferme à l'eau de chute la tubulure P et lui rend accessible la tubulure Q, par laquelle elle vient presser le piston moteur B de droite à gauche, et le ramène à sa position première pour recommencer le même jeu de la machine.

Par suite du déplacement des pistons M, N, O, l'eau qui avait d'abord poussé le piston B en avant se rend par la tubulure P au tube d'émission R.

Pendant le tour du piston B, le levier GG' est ramené dans la position représentée par la figure 86 ; les pistons H et I reprennent leur position première, et l'eau de chute, qui avait porté les pistons M, N, O de droite à gauche, trouvant l'ouverture S libre, s'échappe par cette ouverture. Alors la pression étant presque totalement soustraite sur la droite du piston M, le diamètre du piston N étant plus grand que celui du piston O, l'ensemble MNO est ramené dans la position représentée par la figure 86.

Tous les pistons se retrouvant dans la même situation qu'au commencement de la description, le même jeu de la machine recommence, et ainsi de suite.

La machine est assujettie sur deux grosses pièces de chêne solidement reliées entre elles par de forts ferrements, et reposant sur d'autres pièces de bois transversales reposant à leur tour sur un peu de maçonnerie établie au fond de la galerie.

La hauteur de chute, depuis le réservoir établi à la surface du puits jusqu'à la machine, est de 174 mètres. Mais quand l'eau a produit son effet utile dans la machine, au lieu de s'échapper librement, elle est refoulée par la machine même dans un bassin situé à 11 mètres au-dessus du cylindre; ce qui réduit la chute effective à 163 mètres.

De ce bassin, l'eau douce se distribue dans les galeries pour pratiquer les entailles et se convertir en eau salée; puis revient dans un bassin placé près de la machine et dans lequel aboutit le tuyau d'aspiration. La pompe foule ensuite l'eau salée à une hauteur de 87 mètres.

Le piston moteur et le piston de la pompe ont $0^m,80$ de course. Comme ils exécutent 10 courses simples par minute, leur vitesse par seconde est :

$$\frac{0,80 \times 10}{60} = 0^m,133.$$

L'eau dépensée étant de 14 mètres cubes par heure ou de 3888 litres par seconde, le travail moteur est :

$$3.888 \times 163 = 633^{km},74 \quad \text{ou} \quad 8,45 \text{ chevaux.}$$

D étant le diamètre du piston, on a :

$$\frac{\pi D^2}{4} \times 0,133 = 0,003\,888, \quad \text{d'où} \quad D = 0^m,193, \quad \text{soit} \quad 0^m,20.$$

Les 14 mètres cubes d'eau douce fournissent $15^{mc},900$ d'eau salée saturée à 25°, il faut donc élever 4 417 litres d'eau par seconde à la hauteur de 87 mètres, ce qui exige, 1,2 étant la densité de cette eau, un travail de :

$$4,417 \times 1,2 \times 87 = 461^{km},13.$$

En outre de ce travail, la machine fait encore mouvoir une petite pompe destinée à élever à 4 mètres plus haut les eaux d'infiltration qui viennent constamment s'amasser dans le puisard. Cette pompe absorbant un travail de $27^{km},75$, le travail total produit en une seconde par la machine à colonne d'eau est donc de :

$$461,13 + 27,75 = 488^{km},88 = 6,52 \text{ chevaux.}$$

Le rendement est alors de :

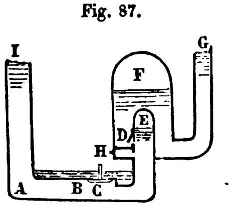
$$\frac{488,88}{633,74} = 0,771.$$

Les tuyaux de chute et d'ascension ont $0^m,10$ de diamètre intérieur.

316. Bélier hydraulique. En 1772, l'horloger Whitehurst, de Derby (Angleterre), fit construire, pour élever des eaux destinées à l'usage d'une brasserie, un appareil fondé sur le même principe que le bélier dont Montgolfier fit construire le premier spécimen en 1796; seulement, au lieu de se mouvoir automatiquement, il exigeait la présence d'une personne pour manœuvrer un robinet remplacé aujourd'hui par une soupape d'arrêt.

Le bélier de Montgolfier (*fig.* 87) se compose des parties suivantes :

Fig. 87.



AB *corps de bélier;* il établit par l'intermédiaire du tuyau de chute AI, de même diamètre et avec lequel il convient de le raccorder par un coude arrondi, la communication entre le réservoir alimentaire et la partie opérante de la machine; IAB est appelé tuyau conducteur;

C *soupape d'arrêt*, plus dense que l'eau, elle est à plaque ou à clapet à charnière, ou à boulet;

D *clapet d'ascension*, qui est respectivement fermé ou ouvert, quand la soupape C est ouverte ou fermée;

La partie qui porte la soupape C et le clapet D s'appelle *tête du bélier;*

E *matelas d'air* destiné à diminuer les fortes secousses de l'eau contre la tête du bélier; il atténue les ébranlements produits par les chocs de la soupape d'arrêt, et facilite le mouvement de l'air dans le réservoir F;

F *réservoir d'air* destiné à rendre régulière l'ascension de l'eau;
G *tuyau d'ascension;*
H *clapet aspirateur* s'ouvrant du dehors en dedans et destiné à fournir, à chaque coup de bélier, une certaine quantité d'air au matelas E et au réservoir F, qui, sans cette précaution, en seraient promptement privés.

La soupape C étant abaissée, l'eau s'écoule par l'orifice ouvert avec une vitesse due à la hauteur de l'eau dans le réservoir alimentaire; mais cette soupape étant d'un poids convenable, elle est entraînée par le courant, et elle vient s'appliquer sur son siège, de manière à fermer passage à l'eau, qui, en vertu de sa vitesse acquise, réagit contre les parois de l'appareil, ouvre le clapet D, pénètre dans le réservoir F, et de là dans le tuyau d'ascension G, où elle s'élève à un niveau supérieur à celui du réservoir alimentaire. Bientôt la vitesse que possédait l'eau est détruite, le clapet D se referme, la soupape C s'abaisse, et une nouvelle période recommence sans interruption. Dès que l'eau a réagi sur la tête du bélier après la fermeture de la soupape C, en vertu de l'élasticité du matelas E et des parois de l'appareil, il se produit un retour d'eau vers la source, qui diminue la pression au point de permettre au clapet H de s'ouvrir et de laisser entrer une certaine quantité d'air dans l'appareil.

Quelquefois, la soupape à plaque C et le clapet D sont remplacés par des boulets creux dont le poids est double de celui de l'eau qu'ils déplacent. Dans ce cas, afin de ne pas gêner la circulation de l'eau dans l'appareil, on place le boulet d'arrêt sur le prolongement de AB, au delà de la position du boulet d'ascension. On a soin de garnir de cuir, de toile goudronnée ou de caoutchouc vulcanisé les orifices que ces boulets doivent fermer.

Un bélier construit par Montgolfier fils, à Mello, auprès de Clermont-sur-Oise, est muni de sept boulets ou soupapes d'arrêt de $0^m,04$ de diamètre, dont les sièges sont sur une même platine en fonte; le boulet ou clapet d'ascension a aussi $0^m,04$ de diamètre. Le corps de bélier est en fonte et pèse 1 450 kilogrammes, la tête du bélier seule pèse 200 kilogrammes. L'épaisseur des tuyaux est $0^m,014$. La capacité du réservoir à air n'est que de 6 litres. Ce bélier, qui est le deuxième du tableau suivant, bat 60 coups à la minute.

317. *Tableau des proportions de différents béliers de Montgolfier, et du rapport de l'effet utile à l'effet dépensé.*

TUYAU CONDUCTEUR.		HAUTEUR.		DIAMÈTRE de la colonne d'ascension.	EAU fournie par la source en 1'.	EAU élevée en 1'.	RAPPORT de l'effet utile à l'effet dépensé.
Diamètre.	Longueur.	de chute.	d'élévation.				
mèt.	mèt.	mèt.	mèt.	mèt.	lit.	lit.	
»	»	2,60	16,06	»	68,00	6,24	0,570
0,108	33,00	11,37	59,44	»	140,00	17,50	0,653
0,054	32,50	10,60	34,10	»	84,00	17,00	0,651
0,203	8,00	0,979	4,55	»	1987,00	269,00	0,629
0,027	33,00	7,00	60,00	0,14	12,42	0,97	0,670

Le premier des béliers de ce tableau est celui que Montgolfier avait établi dans son nabitation à Paris;

Le deuxième est celui de Mello, cité plus haut;

Le troisième a été établi à Lyon par M. Fay-Sathonay, ancien maire de Lyon; la longueur du tuyau d'ascension est de 227 mètres;

Le quatrième est construit à la blanchisserie de M. Turquet, près de Senlis;

Le cinquième se trouve près de Clermont-Oise, dans la sous-préfecture de M. Larochefoucault; la longueur du tuyau d'ascension est de 420 mètres.

Eytelwein fit construire à Berlin, en 1804, deux béliers de grandeurs différentes, et sur un plan arrêté d'avance il fit 1123 expériences, desquelles il a déduit des règles relatives aux dispositions et dimensions les plus favorables à la bonne marche et au rendement.

Les expériences sur le grand bélier ont été les plus complètes, et c'est surtout des résultats qu'elles ont fournis qu'on a déduit les règles et formules empiriques suivantes. Quand ce bélier a été reconnu être disposé de la manière la plus avantageuse, il avait les dimensions suivantes:

Longueur du tuyau conducteur.	13^{m},33
Diamètre *id.*	0 ,0588
Section *id.*	0^{mq},002715
Diamètre dn tuyau d'ascension.	0^{m},0268
Section *id.*	0^{mq},0005641
Capacité du réservoir d'air	0^{mc},0088
Aire de l'ouverture de la soupape d'arrêt. . .	0^{mq},0024

Appelant :

H *la hauteur de pression*, c'est-à-dire la hauteur du niveau de l'eau dans le réservoir alimentaire au-dessus de l'orifice d'échappement de la soupape d'arrêt;
h *la hauteur d'ascension* ou l'élévation verticale de l'orifice supérieur du tuyau d'ascension au-dessus du niveau de l'eau dans le réservoir alimentaire;
Q le volume de l'eau perdue ou écoulée par la soupape d'arrêt en 1″;
$P = 1000Q$ le poids de cette eau;
q le volume de l'eau élevée ou écoulée par le tuyau d'ascension en 1″;
$p = 1000q$ le poids de cette eau,

en une seconde, le travail moteur dépensé est $1000QH^{km}$, le travail utile produit $1000qh^{km}$, et le rendement :

$$R = \frac{qh}{QH}.$$

En étudiant les conditions de nature à assurer le rendement le plus satisfaisant du bélier hydraulique, Bossut et Eytelwein ont constaté que le poids de la soupape d'arrêt doit être modéré, parce qu'au delà d'une certaine limite le nombre de coups de bélier dans un temps donné diminue ainsi que le rendement de la machine.

Eytelwein a étudié le mouvement de la soupape en y fixant une tige verticale munie d'un pinceau qui traçait une courbe sur une bande de papier s'enroulant par un mouvement régulier. Il a ainsi constaté que la durée de l'ouverture de la soupape est à celle de la fermeture dans le rapport approximatif de 3 à 2.

318. *Tableau des résultats fournis par quelques expériences, le bélier ayant les proportions ci-dessus.*

HAUTEUR de battements en 1'.	HAUTEUR		EAU EN 1'.		RENDEMENT R D'APRÈS	
	de chute H.	d'élévation h.	dépensée 60 Q.	élevée 60 q.	l'expérience.	la formule (a).
	mèt.	mèt.	m. cub.	m. cub.		
66	3,066	8,017	0,0484	0,0154	0,900	0,97
.....	.....	.....	......	......	.....	....
54	3,099	9,86	0,0635	0,01742	0,873	0,92
50	3,027	11,78	0,0546	0,01192	0,850	0,87
52	2,437	9,86	0,0371	0,00767	0,847	0,85
45	2,661	11,78	0,0498	0,00952	0,845	0,84
42	2,262	11,78	0,0451	0,00682	0,787	0,78
36	1,843	11,78	0,0404	0,00478	0,754	0,71
26	1,386	9,86	0,0238	0,00225	0,672	0,67
31	1,543	11,76	0,0366	0,00320	0,667	0,65
23	1,255	11,78	0,0505	0,00295	0,548	0,56
17	0,915	9,81	0,0491	0,00218	0,473	0,51
15	0,981	11,78	0,0561	0,00165	0,352	0,45
14	0,758	11,78	0,0548	0,00100	0,284	0,32
10	0,601	11,78	0,0446	0,00041	0,181	0,18

Des expériences d'Eytelwein, puis d'Aubuisson, et plus tard de Morin ont établi des règles et formules empiriques pour l'établissement des béliers hydrauliques; nous allons les résumer.

La formule (a), qui donne des valeurs du rendement R de la dernière colonne du tableau précédent, est due à d'Aubuisson ; elle est :

$$R = \frac{qh}{QH} = 1,42 - 0,28\sqrt{\frac{h}{H}}. \qquad (a)$$

D'Aubuisson remarquant que cette expression ayant été déduite de résultats qui se rapportent au maximum d'effet des béliers, il réduit, pour rentrer dans les conditions habituelles de la pratique, le coefficient numérique de 1/6, et il pose pour l'équilibre dynamique :

$$ph = 1,20\,P\,(H - 0,2\sqrt{Hh}).$$

Le rendement R du bélier diminue assez rapidement à mesure que le rapport $\frac{h}{H}$ augmente ; les résultats obtenus pour des valeurs de ce rapport comprises entre 2,50 et 11 sont convenablement représentés par la formule du général Morin :

$$R = 0,258\sqrt{12,80 - \frac{h}{H}}.$$

Au delà de la valeur 11 de ce rapport, le rendement est si faible qu'il y a lieu de recourir aux pompes.

Q' étant le volume d'eau qui sort du réservoir alimentaire on a :

$$Q' = Q + q,$$

et comme :

$$R = \frac{qh}{QH},$$

de ces deux équations on tire :

$$q = Q' \frac{RH}{h + RH} \quad \text{et} \quad Q = Q' \frac{h}{h + RH}.$$

Ayant Q et q, il s'agit de déterminer les diamètres D et d du tuyau conducteur et du tuyau d'ascension de manière que la vitesse y soit de $0^m,50$, valeur qui paraît convenable pour éviter les chocs violents. Le bélier de Senlis, qui est le plus grand du tableau du n° 317, donne des vitesses plus grandes.

La durée d'un battement étant 1, on a en moyenne, quant au passage de l'eau, 0,575 pour la durée pendant laquelle on peut supposer la soupape d'arrêt complètement ouverte, et 0,231 pour celle pendant laquelle on peut la considérer comme fermée. Ainsi la durée d'un battement étant 1″, on a,

D étant le diamètre du tuyau conducteur et U la vitesse de l'eau dans ce tuyau :

$$\frac{\pi D^2}{4} \times U \times 0,575 = Q;$$

d'où l'on tire, en faisant $U = 0^m,50$:

$$D = 2,104 \sqrt{Q}.$$

d étant le diamètre du tuyau ascensionnel et u la vitesse de l'eau dans ce tuyau, on a de même :

$$\frac{\pi d^2}{4} \times u \times 0,231 = q;$$

d'où, en faisant $u = 0^m,50$:

$$d = 3,32 \sqrt{q}.$$

L étant la longueur du tuyau conducteur, et l celle du tuyau d'ascension, il paraît convenable de faire :

$$L = l + 0,628 \frac{h}{H}.$$

Formule qui devient, pour un tuyau ascensionnel vertical et quand, par suite, h diffère peu de l :

$$L = l \left(1 + \frac{0,628}{H}\right).$$

Le tuyau ascensionnel est en général vertical, et c'est en éloignant

ou rapprochant le bélier du réservoir alimentaire qu'on donne à L une valeur convenable.

Il faut éviter de recourber le tuyau ascensionnel à son sommet.

Il paraît utile de donner au réservoir d'air une capacité égale ou même un peu supérieure à celle du tuyau d'ascension. Cette capacité est à peu près égale au volume d'eau à élever en une minute.

Il convient, dans tous les cas, de donner à l'orifice d'échappement par la soupape d'arrêt :

1° Une aire telle qu'en tenant compte des effets de la contraction, qu'on doit d'ailleurs rendre aussi faible que possible à l'aide de raccords convenables, le passage soit égal à celui qu'offre la section transversale du tuyau conducteur;

2° Une course suffisante pour qu'en admettant que le coefficient de contraction autour de la soupape soit de 0,65, si elle est à plaque, le passage annulaire qu'elle offre au liquide soit encore égal à la section transversale du tuyau conducteur. Pour les soupapes à boulets, la source doit être calculée de manière à obtenir le même résultat.

Pour les béliers de dimensions ordinaires, dont le tuyau conducteur n'aura pas plus de $0^m,20$ de diamètre, on donnera la préférence aux soupapes à plaques, et l'on réservera celles à clapet pour les grands béliers.

La soupape d'arrêt doit être placée aussi près que possible du réservoir d'air et de la soupape d'ascension qui débouche dans le réservoir d'air.

L'aire de l'orifice de la soupape d'ascension doit aussi être égale à celle de la section transversale du tuyau conducteur.

Quoique le rendement d'un bélier ne soit pas diminué ni sa marche modifiée quand la soupape d'arrêt est noyée, comme les chocs produits par l'abaissement de cette soupape sont notablement plus violents, il convient de disposer l'appareil de manière que la soupape d'arrêt ne soit noyée que pendant les crues accidentelles d'aval.

319. L'Exposition de 1889 présentait des béliers de grandes dimensions construits par M. Bolée, du Mans, qui déjà à l'Exposition de 1878 avait apporté des perfectionnements à cet appareil. M. Durozoi, ingénieur-constructeur, avait exposé quatre types de béliers hydrauliques décrits dans la *Revue technique de l'Exposition universelle de* 1889 (chez E. Bernard et Ce, à Paris) :

1° Un bélier ordinaire;

2° Un bélier à double effet;

3° Un bélier-pompe à diaphragme;

4° Un bélier-pompe à piston différentiel.

Les deux premiers types sont destinés à utiliser la puissance d'une chute d'eau, en élevant à une certaine hauteur une partie de son eau. Le troisième type élève à une hauteur modérée une eau différente de celle de la chute. Le quatrième type peut indifféremment élever une partie de l'eau motrice ou de l'eau différente à une grande hauteur.

320. Pompes. Les pompes sont dites à *simple effet*, lorsqu'elles n'élèvent l'eau que pendant l'allée ou pendant la venue du piston, c'est-à-dire

pendant la montée ou pendant la descente du piston si le corps de pompe est vertical (*fig.* 88 et 89).

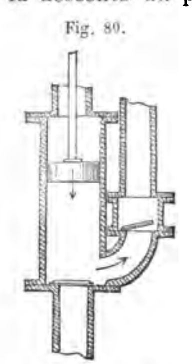
Fig. 88.

Les pompes sont à *double effet* lorsque l'eau est élevée pendant l'allée et pendant la venue du piston.

Lorsque le piston s'élève au-dessus du niveau de l'eau dans le puisard, on dit que la pompe est *aspirante.*

Une pompe est *élévatoire*, ou *foulante*, selon qu'elle élève l'eau pendant que le piston est sollicité respectivement par traction, ou par compression, par sa tige. La pompe verticale élévatoire représentée par la figure 88 élève l'eau pendant la montée du piston, et les pompes verticales foulantes représentées par les figures 89 et 90 l'élèvent pendant la descente du piston.

Une pompe à double effet est à la fois foulante et élévatoire.


Fig. 90.

Une pompe peut être *aspirante et élévatoire*, ou *aspirante et foulante*, ou encore *aspirante, foulante et élévatoire;* l'un de ces cas se réalise toutes les fois que le piston s'élève à un niveau supérieur à celui de l'eau dans le puisard, ce qui a lieu généralement.

Le *piston* n'est quelquefois qu'un simple morceau de bois de charme, qu'il convient de faire bouillir dans l'huile; mais pour les pompes de quelque importance il est en fonte ou en bronze. La garniture est en cuir, et elle forme sur les faces du piston un godet à contour flexible que l'eau comprimée applique contre les parois du corps de pompe, ce qui donne une garniture *autoclave.*

Souvent, comme dans la figure 90, le piston est un cylindre métallique plein ou creux, d'une longueur un peu supérieure à sa course, et d'un diamètre de $0^m,01$ à $0^m,02$ plus petit que celui du corps de pompe. Ce piston, appelé *plunger* par les Anglais, plonge dans le corps de pompe et prend la place de l'eau qui s'y trouve, en l'obligeant de s'élever dans le tuyau d'ascension; en se retirant, il laisse un vide qui produit l'aspiration. La garniture de ce piston est fixe et sert de *stuffing-box.*

Une pompe à simple effet exige l'emploi de deux soupapes : l'une, dite *soupape d'aspiration*, placée sur le tuyau d'aspiration, le plus près possible du point inférieur de la course du piston; l'autre, appelée *soupape de retenue*, placée sur le tuyau d'ascension. L'une de ces soupapes peut être placée sur le piston (*fig.* 88), qui est alors percé d'un orifice convenable pour le passage de l'eau; la soupape fixe prend le nom de *soupape dormante.* Une pompe à double effet est garnie de quatre soupapes dormantes; le piston n'en porte pas.

Afin de pouvoir vérifier facilement l'état des soupapes et en rendre rapides les réparations, il convient de renfler les tuyaux aux points où elles se trouvent (*fig.* 90); ces renflements, qu'on nomme *chapelles*,

portent une grande ouverture fermée par une plaque de fonte boulonnée.

La figure 90 représente à l'échelle de 1/20 la coupe par l'axe d'une pompe à piston plongeur.

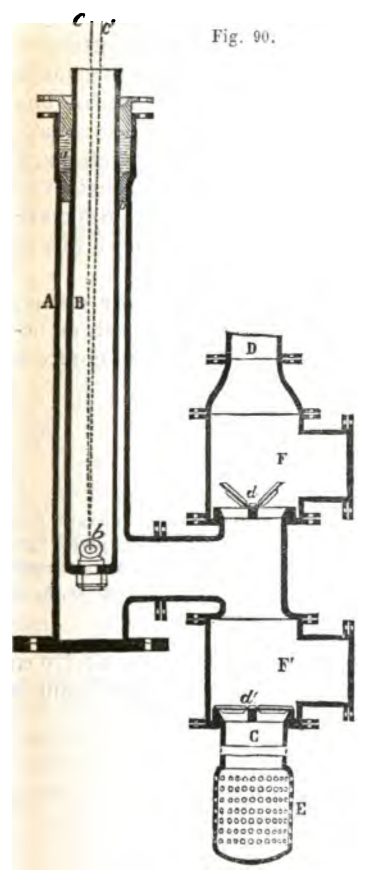


Fig. 90.

A corps de pompe ;
B piston, au fond duquel est boulonnée une oreille à laquelle s'articule la tige de la pompe. En fixant la tige au bas du piston, on diminue son obliquité, et par suite le frottement du piston dans son stuffing-box ;
bc, bc' lignes représentant les positions de l'axe de la tige dans ses plus grands écarts ;
a étoupes du stuffing-box ;
o coussinet en bronze retenant les étoupes ;
F, F' chapelles ;
D tuyau d'ascension ;
C tuyau d'aspiration ;
E *lanterne ;*
d soupape de retenue ;
d' soupape d'aspiration.

Si le piston faisait un vide parfait, l'eau s'élèverait dans la colonne d'aspiration à une hauteur de 10^m,33 au-dessus du niveau du puisard, hauteur faisant équilibre à la pression atmosphérique au point où se trouve la pompe ; mais, dans la pratique, quand le piston est au bas de sa course, la pression de l'air qui occupe l'espace compris entre le piston et la soupape d'aspiration étant, en négligeant le poids de la soupape, égale à la pression atmosphérique, quand le piston est en haut de sa course la pression de cet air devient :

$$h \frac{q}{Q+q}.$$

h pression atmosphérique ;
q *espace nuisible* ou volume de l'air lorsque le piston est au bas de sa course ;
Q volume engendré par le piston dans une levée ;
$Q+q$ volume occupé par l'air lorsque le piston est en haut de sa course.

Pour que la pompe puisse s'amorcer, après un certain nombre de coups de piston, c'est-à-dire pour que l'eau puisse entrer dans le corps de pompe, il faut donc qu'on ait au maximum, en désignant par x la hauteur de la soupape d'aspiration au-dessus du puisard, et en négli-

geant le poids de cette soupape :

$$x = h - h\frac{q}{Q+q} = h\left(1 - \frac{q}{Q+q}\right).$$

Il ne faut pas seulement que l'eau puisse pénétrer dans la partie intérieure du corps de pompe, mais il faut encore qu'elle puisse atteindre le point le plus élevé de la course du piston, lequel, en négligeant le poids des soupapes et la force élastique de l'air et de la vapeur que dégage l'eau soumise à une faible pression, peut se trouver à une hauteur $h = 10^m,33$ au-dessus du niveau du puisard. Dans la pratique, il est rare que l'eau puisse s'élever à 9 mètres de hauteur; il convient de considérer 8 mètres à $8^m,50$ comme hauteur moyenne d'élévation maximum. La hauteur de la colonne d'aspiration ne se prend guère que de 5, 6 ou 7 mètres.

321. La *vitesse* avec laquelle l'eau peut entrer dans le corps de pompe, lorsque le piston occupe un point quelconque de sa course, est, en négligeant le poids des soupapes, leur frottement et celui de l'eau contre le tuyau d'aspiration :

$$v = \sqrt{2g(h - h')}. \qquad (a)$$

v vitesse de l'eau dans la soupape d'aspiration ;
h pression atmosphérique exprimée en colonne d'eau qu'on élève ;
h' hauteur du point où se trouve le piston au-dessus de l'eau dans le puisard. Cela suppose que l'eau ne dégage ni air ni vapeur, et qu'elle atteint le piston; s'il n'en était pas ainsi, h' serait égale à la hauteur du niveau de l'eau dans le corps de pompe, au-dessus du puisard, augmentée de la pression de l'air et de la vapeur qui sépare l'eau du piston ;

Pour que le piston fonctionne sans choc, il suffit que l'eau arrive en même temps que lui au point supérieur de sa course. Supposant la vitesse du piston uniforme, il suffira donc qu'on ait :

$$ksv = SV, \quad \text{d'où} \quad s = \frac{SV}{kv}.$$

k coefficient de la dépense (139) ;
s section de la soupape d'aspiration ;
v vitesse de l'eau dans cette soupape, quand son niveau arrive au point supérieur de la course du piston ; v a alors sa plus petite valeur (a) ;
S section du piston ;
V vitesse du piston.

Si le piston est mû par une manivelle ou par un excentrique, sa vitesse n'est pas uniforme; dans ce cas, pour s'assurer que le corps de pompe sera plein quand le piston arrivera au haut de sa course, on déterminera d'abord par tâtonnement le point où l'eau peut commencer à ne plus suivre le piston; pour ce point, on aura :

$$ksv = SV,$$

v et V ayant les valeurs qui correspondent à ce point, v se détermine

par la formule (a), et V est donnée, d'une manière approchée, à l'aide d'une épure représentant le mouvement du piston par rapport à celui du bouton de la manivelle. Pendant que la manivelle termine le reste de sa course, il faut que le volume d'eau qui s'introduit dans le corps de pompe soit égal au volume engendré par le piston pour arriver à la fin de sa course.

Ce volume est [nº 169, formule (e)] :

$$Q' = Tks\sqrt{2g}\left(\sqrt{h_1} - \frac{Tks\sqrt{2g}}{4S}\right).$$

Q' volume d'eau qui s'introduit dans le corps de pompe pendant le reste de la course du piston ;
T temps que met le piston à terminer sa course ;
h_1 différence de charge sur les deux faces de la soupape d'aspiration, au commencement du temps T ; elle est égale à h diminué de la hauteur du poids où l'eau commence à ne plus suivre le piston, au-dessus du puisard.

Au nº 169, la section s de la soupape représente la section de l'orifice d'écoulement, et la section S du corps de pompe, la section A du bassin qui se remplit.

Pour que le piston ne choque pas l'eau quand il change de direction, on doit avoir, au minimum :

$$Q' = LS.$$

L espace qu'il reste à parcourir au piston pour terminer sa course.

Dans la pratique, il convient non seulement d'atteindre cette limite pour Q', mais aussi que l'eau accompagne le piston pendant toute sa course. On devra donc prendre s pour le cas où les valeurs, correspondantes entre elles, de V et v, exigent la valeur maximum de s.

Les diamètres des tuyaux d'aspiration et d'ascension sont ordinairement compris entre la 1/2 et les 2/3 de celui du corps de pompe ; il ne convient pas de les prendre de moins de la moitié, et quelquefois ils sont égaux à celui du piston.

Pour une pompe quelconque, l'équilibre dynamique donne, en négligeant toutes les résistances passives (49) :

$$\mathcal{T}_m = PH.$$

$\mathcal{T}_m$ travail moteur transmis à la tige du piston ;
P poids de l'eau élevée ;
H hauteur à laquelle on élève l'eau au-dessus du puisard ;
PH effet utile produit.

Dans la pratique, l'effet utile est diminué par le frottement de la garniture du piston contre les parois du corps de pompe, par celui de la tige du piston dans le stuffing-box (61), et par celui de l'eau contre les parois des tuyaux et du corps de pompe ; il est diminué aussi par le poids et le frottement des soupapes, par les variations de direction et de vitesse que subit l'eau dans son parcours, et par la vitesse que conserve l'eau à sa sortie du tuyau d'ascension. Avec des pompes bien

proportionnées, on peut obtenir PH = de 0,75 à 0,85 $\mathcal{T}_m$; mais il convient de ne compter que sur 0,75 $\mathcal{T}_m$ et même moins.

Pour des pompes bien construites et en très bon état d'entretien, le volume d'eau élevé est égal à celui engendré par le piston, diminué de 0,03 à 0,04; mais, pour les pompes ordinaires, ce déchet va à 0,1, même à 0,2. Des pompes, au lieu d'élever un volume d'eau moindre que celui engendré par le piston, ont donné un débit plus grand; cela tient à ce que l'eau en mouvement continue encore sa marche après l'arrivée du piston à la fin de sa course; ce qui ne peut avoir lieu qu'autant que la vitesse est grande, circonstance qu'il faut éviter.

Des expériences faites au Conservatoire des arts et métiers sur des pompes à incendie de trois constructeurs, Letestu, Flaud et Perrin, ont donné en moyenne 0,910 pour le rapport du volume engendré par les pistons à celui de l'eau élevée, et 0,207 pour le rendement en effet utile quand l'eau est élevée à des hauteurs de 3 à 5 mètres, et 0,358 quand elle est projetée avec la lance.

D'autres expériences faites au Conservatoire sur des pompes d'épuisement des constructeurs Delpech, Denizot, Letestu et Nillus, ont donné en moyenne 0,932 pour le rapport des volumes, et 0,562 pour le rendement. Ce rendement est descendu à 0,500 et s'est élevé jusqu'à 0,690.

Pour les pompes employées à élever les eaux dans les villes, et qui sont en général à double effet, le rapport des volumes atteint 0,90 à 0,95, et l'on peut compter sur un rendement de 0,70 à 0,75.

Pour les épuisements de mines, on a quelquefois à élever l'eau à des hauteurs considérables. On peut le faire d'un seul jet quand on a recours à un piston régulateur, ou à tout autre moyen, pour éviter les changements brusques de vitesse et de direction, et par suite les chocs des clapets sur leur siège. C'est ce qu'on a fait à Huelgoat et à Illsang pour les hauteurs respectives de 230 et 356 mètres (314). Mais comme avec les dispositions ordinaires les clapets durent peu, il convient qu'une même pompe n'élève l'eau qu'à une hauteur de 30 à 60 mètres, et d'avoir recours, pour des hauteurs plus considérables, à plusieurs pompes étagées sur la profondeur du puits.

Pour les pompes mues à bras d'homme, la course du piston est de $0^m,30$ environ; pour celles mues par des machines, elle est ordinairement de 1 mètre à $1^m,20$, quelquefois elle va à 2 mètres, et à Huelgoat elle est de $2^m,30$.

La vitesse du piston d'une pompe marchant régulièrement atteint rarement $0^m,30$; à Huelgoat (Finistère) elle va cependant à $0^m,42$; mais il convient qu'elle soit comprise entre les limites $0^m,16$ et $0^m,24$.

Pour l'épuisement des mines de plomb du Bleyberg, on a établi deux machines, système Cornouailles, d'une puissance qui dépasse tout ce qui avait été fait, même en Angleterre.

Le piston à vapeur de chaque machine a $2^m,67$ de diamètre et une course de $3^m,66$.

Les pistons des pompes ont le même diamètre que ceux à vapeur, mais seulement $2^m,86$ de course. Avec ces dimensions, on a dû employer les

soupapes à double siège ou à lanternes, qui sont beaucoup plus faciles à soulever, une partie de la pression de l'eau n'agissant pas sur la soupape.

Les machines peuvent donner facilement sept levées par minute; elles sont à haute pression, à détente et à condensation. En supprimant la détente, chaque machine pourrait donner une puissance de 700 à 800 chevaux.

Dans des expériences faites avec soin, la profondeur d'épuisement n'étant encore que de $71^m,50$, et la détente ayant lieu aux 0,19 de la course, l'effet utile moyen a été de 234 chevaux, et la consommation de combustible de $1^k,45$ par cheval utile et par heure. Le volume d'eau élevé a été un peu supérieur à celui engendré par les pistons.

322. Pour les **pompes à incendie**, il y a deux pistons qui ont ordinairement $0^m,12$ de course, et qui ne s'élèvent, dans les mouvements les plus rapides, que 60 fois par minute, ce qui correspond à $0^m,24$ de vitesse. Les pistons, qui sont en bronze, ont environ $0^m,60$ de longueur et $0^m,12$ de diamètre. Le récipient d'air, qu'on place entre les deux corps de pompe, a ordinairement $0^m,55$ de hauteur sur $0^m,25$ de diamètre; il est destiné à rendre constant le jet d'eau. Le long ajutage ou *lance* qu'on dirige vers le feu à éteindre a environ $0^m,016$ de diamètre à l'orifice. Avec les proportions et la vitesse précédentes, huit pompiers obtiennent un jet de 26 mètres de hauteur (201).

Voici un tableau des résultats qu'on obtient à l'aide des différents modèles de pompes à incendie employés à Paris (maison Emonin) :

DIAMÈTRE DES PISTONS.	NOMBRE d'hommes.	DÉBIT théorique par minute.	PORTÉE MAXIMA DU JET.	
			Distance.	Hauteur.
m.		litres	mètres	mètres
0,125	12	400	38	30
0,110	8 ou 10	310	36	28
0,095	6	210	34	26
0,090	4	175	28	22
Sur brouette 0,100	2 ou 4	175	28	»
Sur brouette 0,090	2 ou 4	150	25	»
Sur brouette 0,085 (un seul piston)	1 ou 2	60	20	»

Pour les grandes pompes, afin de rendre, autant que possible, le mouvement de l'eau constant dans la colonne d'ascension, et même dans celle d'aspiration quand elle est longue, il convient de munir chacune d'elles d'un récipient d'air placé à la partie inférieure; ces récipients ont encore l'avantage de rendre moins violents les chocs des soupapes.

Quand les eaux tiennent en suspension des corps étrangers, on garnit le bas du tube plongeur d'une caisse percée de petits trous, appelée *lanterne;* l'eau arrive dans la colonne d'aspiration en passant par ces petits trous, où elle subit, en quelque sorte, une filtration.

323. Pompes Worthington. Ces pompes sont à vapeur et à action directe, c'est-à-dire que le piston de la machine à vapeur et celui de la pompe ont une tige commune. Il en résulte que les pistons des pompes à fin de course ont un temps d'arrêt; ce qui est une bonne condition. On sait en effet que, dans une pompe ordinaire, le piston arrivé à la fin de sa course change immédiatement le sens de sa marche; en même temps, les soupapes levées se ferment brusquement, et l'eau aspirée qui suivait le piston prend brusquement une marche en sens inverse pour être refoulée. Il en résulte une perte de charge et des remous qui nuisent au bon fonctionnement de la pompe. Dans les pompes Worthington, il se produit un temps d'arrêt qui supprime ces inconvénients. Les soupapes se ferment lentement et la colonne liquide arrive au repos avant de prendre un mouvement en sens contraire.

Pour arriver à régulariser le débit, le système se compose de deux pompes à vapeur indépendantes. L'un des pistons à vapeur, arrivé à la fin de sa course, commande l'admission de la vapeur dans le second cylindre. Il en résulte que l'un des corps de pompe étant à l'arrêt, l'autre est en marche. Lorsque la vapeur est admise pendant toute la course du piston, le travail moteur et le travail résistant sont égaux et uniformes. Mais, dans certaines installations où l'on fait de la détente,

Fig. 91.

par raison d'économie, il a fallu appliquer une disposition pour régulariser le mouvement et remplacer le volant qu'on ne pouvait employer à cause des arrêts des pistons de pompe à la fin de chaque course. M. Worthington imagina alors un dispositif connu sous le nom de *cy-*

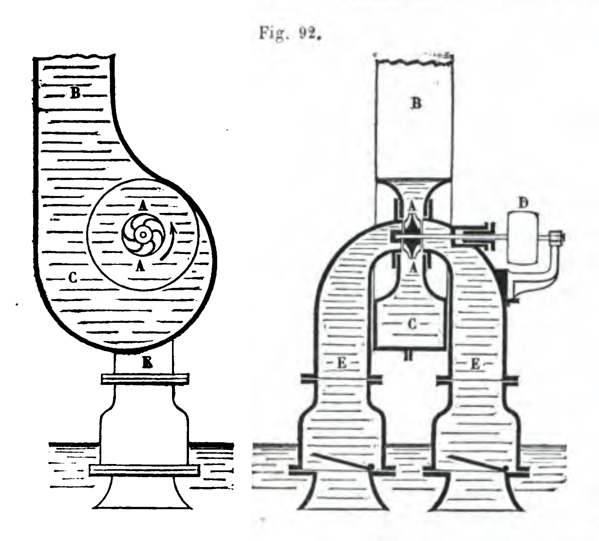
lindres compensateurs. Ces cylindres C sont oscillants et placés à l'extrémité de la tige des pistons des pompes. Ces cylindres communiquent par leurs tourillons avec une colonne d'eau ou un accumulateur.

Ainsi, V étant le cylindre à vapeur et P celui des pompes, les pistons de ces deux cylindres ont une tige commune. Pour comprendre le rôle du cylindre compensateur C, il suffit d'étudier les situations relatives de ces trois cylindres. La figure (*a*) montre le piston à vapeur recevant la vapeur à pleine pression et avançant de V vers P; en même temps, le piston compensateur C est en résistance, puisqu'il refoule l'eau du compensateur. La figure (*b*), qui correspond à la période de détente de la vapeur, montre que le piston compensateur C va descendre; par conséquent, le travail du cylindre compensateur s'ajoute à celui de la vapeur qui se détend. Il y a donc là une sorte de compensation. La figure (*c*) donne la situation respective des trois cylindres à la fin de la période de détente.

Ces sortes de pompes sont extrêmement répandues en Angleterre et en Amérique. Elles étaient représentées à l'Exposition universelle de 1889. (Voir la *Revue technique de l'Exposition de* 1889.)

324. Pompes à force centrifuge. On donne ce nom à divers appareils employés surtout pour élever de grandes quantités d'eau à une faible hauteur, par l'intervention de la force centrifuge. Une des meilleures de ces pompes est due au constructeur anglais Appold. Elle consiste, comme le montre la figure 92, en coupes verticales faites dans deux sens

Fig. 92.



rectangulaires entre eux, en une roue AA de la forme d'un ventilateur à ailes courbes (354), dans laquelle l'eau est aspirée par les deux joues, et refoulée sur tout le pourtour dans une caisse enveloppante C, d'où part le tuyau d'ascension B. Une courroie sans fin, passant sur la poulie D montée sur l'arbre de la roue, transmet le mouvement à l'appareil. Les ailes, limitées à deux couronnes qui y sont fixées, sont divisées au

milieu de leur longueur par une cloison verticale; c'est ce que montre la partie droite de la figure 92.

La roue et son enveloppe peuvent être plongées dans l'eau du puisard, ou placées au-dessus du puisard, avec lequel elles sont alors mises en communication au moyen de tuyaux d'aspiration E, E munis à leur partie inférieure de soupapes d'arrêt ou de clapets de pied. Dans l'un et l'autre cas, dès que la roue est entièrement recouverte d'eau, si on la fait tourner avec une certaine vitesse, l'action de la force centrifuge repousse vers la circonférence l'eau qui y est contenue, et il en résulte vers l'axe une diminution de pression d'autant plus grande que la roue marche plus vite. Par conséquent l'eau du puisard se trouve aspirée vers l'intérieur de la roue, et y pénètre en vertu de l'excès de la pression atmosphérique sur la somme de la pression intérieure et de la hauteur de laquelle l'eau est aspirée. Cet excès de pression doit toujours être suffisant pour que l'eau affluente alimente convenablement la roue. On voit que cette machine fonctionne comme une pompe aspirante et foulante (320), et la hauteur d'aspiration ainsi que celle de refoulement et la quantité d'eau élevée dépendent de la vitesse imprimée à la roue.

Une roue de ce genre, installée au Conservatoire des arts et métiers, est placée à $0^m,95$ environ au-dessus du niveau de l'eau dans le puisard. Elle a $0^m,230$ de diamètre extérieur, et $0^m,073$ de longueur parallèlement à l'axe. Un plateau plein divise sa longueur en deux parties égales, et les deux couronnes qui la limitent ont chacune au centre une ouverture de $0^m,116$ de diamètre pour l'introduction de l'eau. Le plateau intérieur et souvent aussi les couronnes sont profilés en courbe, pour changer graduellement et sans choc la direction des filets fluides, qui entrent vers le centre dans le sens de l'axe et doivent pénétrer entre les aubes dans le sens du rayon.

Les aubes ou palettes, au nombre de six, sont courbes, et disposées, comme dans les turbines, de manière que les filets fluides entrent, à une certaine vitesse, à peu près sans choc dans la roue, et en sortent à peu près tangentiellement à la circonférence extérieure.

Deux tuyaux d'aspiration E, E amènent l'eau aux orifices centraux d'introduction, et sont munis à leur pied de soupapes d'aspiration et de retenue. Ces tuyaux ont $0^m,370$ de diamètre à la partie inférieure qui contient la soupape d'aspiration, $0^m,345$ au corps E, et $0^m,116$ à leur rencontre avec la roue. Le diamètre des soupapes est de $0^m,225$, et celui du tuyau d'ascension B, $0^m,360$.

Des expériences faites par Morin sur trois roues de mêmes dimensions, la première à aubes courbes et figurant à l'Exposition universelle de Londres en 1851, la deuxième à aubes planes inclinées à 45° sur le rayon, et la troisième à aubes planes dirigées suivant le rayon, ont fourni les résultats suivants :

AUBES.	NUMÉROS des expériences.	TOURS par minute.	EAU élevée par seconde.	HAUTEUR d'élévation.	EFFET UTILE par seconde.	TRAVAIL moteur par seconde.	RENDEMENT.
			litres	mèt.	km.	km.	
Courbes.	1	828	150,0	2,590	413,06	717,60	0,588
	2	718	124,0	2,745	340,00	525,00	0,648
	3	792	87,0	5,690	500,00	771,00	0,649
	4	792	97,2	5,690	552,00	807,80	0,685
	5	788	93,5	5,897	554,00	810,00	0,680
	6	800	94,6	5,897	558,00	859,00	0,650
	7	843	32,3	7,970	261,00	697,00	0,375
	8	876	51,0	8,235	424,00	891,00	0,475
A 45°.	1	694	42,40	5,480	233,00	583,00	0,398
	2	690	55,81	5,480	306,00	698,00	0,434
Suivant le rayon.	1	720	35,87	5,480	197,00	810,00	0,243
	2	624	27,90	5,480	153,00	660,00	0,232

Les roues fonctionnaient entièrement noyées dans l'eau du puisard. L'eau y entrait des deux côtés sans tuyaux d'aspiration ni soupapes d'arrêt; mais il est en général préférable d'avoir recours à ces tuyaux et soupapes, l'eau du puisard pouvant, ne serait-ce qu'accidentellement, baisser au point de dénoyer la roue en partie ou en totalité. Ces roues avaient $0^m,305$ de diamètre extérieur, et leurs ouvertures centrales $0^m,1525$; leur longueur, parallèlement à l'axe, était de $0^m,079$.

La pompe Appold, fort employée dans les travaux publics, a l'avantage de n'exiger que de faibles dimensions pour élever de grands volumes d'eau. Nous renvoyons, pour des détails sur l'établissement des pompes Appold, à l'ouvrage du général Morin : *Des machines et appareils à élever les eaux.*

M. L. Dumont, à Paris, fabrique des pompes du même genre.

L'*effet utile* de ces pompes centrifuges est d'environ 60 p. 100, si la hauteur d'aspiration est moindre de 4 mètres, et la hauteur d'ascension au-dessous de 15 mètres. Pour de plus grandes hauteurs, l'effet utile diminue beaucoup.

La vitesse à la circonférence la plus avantageuse est :

$$\frac{3}{2}\sqrt{2gH}.$$

H hauteur totale d'ascension;
g accélération de la pesanteur ($9^m,81$ à Paris).

La *dépense en force* N est, en chevaux :

$$N = \varphi \frac{QH}{75 \times 60} 1000.$$

Q quantité d'eau à élever, par minute;
$\varphi = 1,4$ à 2;
H hauteur totale d'ascension.

La vitesse de l'eau dans les tuyaux doit être de 1 mètre par seconde

pour les petits diamètres; de 2 mètres à 2m,80 pour les gros diamètres.

Le diamètre extérieur de la roue à palettes ou turbine est environ le triple du diamètre du tuyau d'aspiration. La largeur intérieure de la turbine est environ le tiers du même diamètre, et sa largeur extérieure deux à trois fois plus grande que la largeur intérieure. Les aubes ou palettes sont généralement au nombre de 6 ou 12. Le corps de la pompe Dumont se construit en deux parties, jointes à boulons, dans le plan de symétrie.

Dans le numéro d'avril 1873 des *Annales des ponts et chaussées*, Durand-Claye a publié une *Étude sur les pompes centrifuges simples et sur les pompes centrifuges accouplées*, dont nous extrayons ce qui suit :

Les spécimens de pompes centrifuges qui figuraient à l'Exposition de 1855 étaient considérés comme une nouveauté. On fut frappé des avantages spéciaux à cet engin : dimensions excessivement restreintes, facilité d'installation, absence de toute soupape et de tout clapet, ce qui, joint à la continuité du mouvement, permettait l'élévation des corps solides mêlés à l'eau, tels que sables, boues, etc. Mais en même temps on lui reprocha un vice qui semblait inhérent au système : la vitesse de rotation des ailettes, excessivement grande, surtout dans les premiers appareils, semblait avoir pour conséquence forcée une vitesse absolue considérable de l'eau à la sortie des aubes; or, l'appareil refoulant l'eau, soit dans un réservoir où le liquide est essentiellement immobile, soit dans une conduite où la vitesse est relativement modérée, la vitesse absolue en question dépassait notablement la valeur nécessaire et suffisante pour assurer le mouvement d'ascension régulier et permanent de l'eau. L'excès de vitesse ainsi créé se perdait forcément en remous et agitations inutiles, et constituait une perte de travail entraînant une réduction correspondante dans le rendement. Malgré cette critique, les pompes centrifuges gardaient leur caractère d'extrême simplicité et de faible volume. Lorsqu'en 1867 la ville de Paris commença ses essais sur les eaux d'égout, et qu'il fallut élever un liquide rempli d'immondices, pailles, sables, débris végétaux ou animaux, on songea immédiatement à une pompe centrifuge pour effectuer l'élévation du cube enlevé journellement au collecteur de Clichy et destiné aux expériences. M. l'ingénieur en chef Mille fit installer une pompe du système Coignard; suivant la disposition habituelle de ces engins, la pompe refoulait les eaux par une conduite verticale de 0m,15 dans un petit réservoir, d'où ces eaux se rendaient par des tuyaux de 0m,22 de diamètre au lieu d'exploitation; la pompe avait un petit volume; le diamètre extérieur du tambour mobile était de 0m,255; elle faisait de 1200 à 1400 tours à la minute, marchant ainsi à grande vitesse; les aubes de la roue intérieure étaient courbes. En service normal, le débit était de 0mc,015 à 0mc,020 par seconde. Le service se fit dans de bonnes conditions, au moins au point de vue de la continuité de l'élévation des eaux; les corps étrangers de trop grande dimension étaient arrêtés par une grille placée à la prise d'eau; les menus détritus passaient assez facilement par les aubes.

Sur la proposition et avec le concours de Farcot, Durand-Claye adopta une disposition nouvelle en 1868; le cube à élever à la seconde était alors de 0^{mc},150; il fut fourni par deux groupes de pompes commandés chacun par une machine à vapeur de 20 chevaux; chaque groupe comprenait deux pompes centrifuges identiques montées sur le même arbre, mais réunies par un conduit commun (système Périgault); ce conduit part de la circonférence extérieure de la première pompe et ramène l'eau sur l'axe de la deuxième; c'est de la circonférence extérieure de cette deuxième pompe que part la conduite de refoulement. Celle-ci a, du reste, une direction quelconque; elle n'est pas assujettie à être verticale. Elle se raccorde par un cône et une culotte en fonte avec une grosse conduite de refoulement de 0^{m},600 de diamètre, laquelle conduit les eaux à une distance de 2 000 mètres. Les aubes sont planes sans aucune courbure, dirigées suivant le rayon, et au nombre de quatre pour chaque pompe. Les dimensions de la pompe sont assez considérables; le diamètre des ailettes est de 0^{m},440. Le mouvement de rotation est assez lent; il varie suivant les cas de 420 à 500 tours à la minute.

Ainsi, suppression du réservoir situé verticalement au-dessus des pompes, refoulement direct dans une longue conduite, et surtout accouplement de deux pompes identiques sur un même arbre avec aubes de la forme la plus simple et vitesse réduite : telles étaient les conditions nouvelles du système élévatoire.

Le service se fit avec la régularité attendue : 0^{mc},150 purent être élevés couramment à la seconde; le système donnait ainsi la preuve qu'il était capable de fournir à la journée $0{,}150 \times 86\,400 = 14\,960$ mètres cubes, quelque sales que fussent les eaux, à la seule condition qu'on éloignât, par une grille à larges mailles, les corps dont le diamètre était trop considérable pour permettre leur entrée par l'œil central d'admission des pompes. Malgré le sable constamment suspendu dans les eaux, l'usure de l'appareil est très faible.

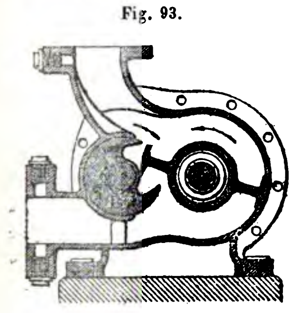
Les résultats obtenus ont engagé Durand-Claye et Farcot à adopter un appareil du même genre pour une nouvelle usine. Cette fois encore, les dimensions et le cube à traiter ont considérablement augmenté; c'est un volume de 0^{m},500 à la seconde, soit 43 200 mètres cubes par jour, qu'une seule pompe centrifuge accouplée élève; elle est mue par une machine horizontale de 150 chevaux, dont le volant actionne directement l'arbre des pompes. Le diamètre intérieur du tambour des pompes atteint 1^{m},60. Les ailettes conservent leur forme simplement rectiligne; l'admission de l'eau n'a lieu que d'un seul côté de chaque tambour. La vitesse de rotation est encore réduite; elle n'est plus que de 130 à 140 tours à la minute. Cinq autres appareils identiques permettent, avec une force totale de 900 chevaux, d'enlever journellement à la Seine 260000 mètres cubes d'eau sale, soit le cube fourni par le collecteur de Clichy.

Durand-Claye résume ainsi son appréciation : Les pompes centrifuges sont des appareils d'une extrême simplicité, de petit volume, à marche continue, convenables par l'absence de clapets pour l'élévation des eaux

chargées de matières solides. Leur rendement peut s'améliorer d'une manière notable en accouplant deux pompes identiques sur un même arbre et réduisant ainsi la vitesse de rotation; nous l'avons vu atteindre théoriquement 0,75, avec une hauteur d'élévation de 12 mètres. La pratique a donné dans l'usine de Clichy des rendements de 0,55 à 0,63 pour des appareils auxquels la théorie assignait 0,68. Les pompes à piston ne dépassent guère pour une élévation de 12 mètres des rendements de 0,65 à 0,70, et n'atteignent 0,80 que pour les fortes hauteurs, alors que la perte de charge due aux clapets devient proportionnellement faible par rapport à des hauteurs d'élévation de 50 à 60 mètres. L'écart entre les deux systèmes de pompes tend donc à se rapprocher. C'est un fait digne de l'attention des ingénieurs et des industriels qui peuvent être exposés, comme Durand-Claye l'a été lui-même, à renoncer aux anciens types, par crainte d'engorgement et d'usure, pour s'attacher aux appareils rotatifs à grandes sections et à larges ouvertures.

325. Pompes rotatives Greindl. La pompe Greindl (*fig.* 93) se compose d'une caisse ouverte latéralement sur deux faces, et dans laquelle se meuvent deux rouleaux cylindriques tangents, dont l'un porte deux palettes. La pompe ne peut tourner que dans un sens, la palette inférieure s'éloignant de la tubulure horizontale d'aspiration. Ce sont, en définitive, les deux palettes du rouleau de droite qui font office de piston, et qui, dans leur mouvement de rotation continue, entrent alternativement, *avec jeu*, dans une échancrure de force épicycloïdale ménagée sur toute la longueur du rouleau de gauche. Deux engrenages reliant les axes des deux rouleaux donnent au rouleau de gauche une vitesse de rotation double de la vitesse du rouleau de droite (1), ce qui assure le dégagement successif des deux palettes par l'échancrure unique. Ces engrenages sont à doubles chevrons et alternés, parce qu'en vertu de ses fonctions même, et comme cela ressortira plus loin, le rouleau échancré ne travaille réellement que pendant 1/6 environ de sa révolution lorsque l'axe du rouleau à palettes est directement actionné. Des engrenages ordinaires, comportant nécessairement un certain jeu entre les dents en contact, ne pourraient se prêter sans bruit ni chocs à ce fonctionnement intermittent; et les engrenages à doubles chevrons alternés sont au contraire excellents pour cette conduite, à la seule condition d'être exécutés avec les soins nécessaires. Leur emploi est plus simple que celui de deux ou trois paires d'engrenages droits juxtaposés et alternés, susceptibles, à la rigueur, de donner les mêmes résultats.

Fig. 93.



(1) La poulie de commande est calée sur l'arbre du rouleau à encoche; l'entraînement du rouleau à palettes, à une vitesse moitié moindre, est produit par des engrenages à doubles chevrons et alternés, ce qui permet au système de fonctionner sans bruit ni chocs.

Dans les moments où le passage de l'échancrure interrompt le contact entre les circonférences des rouleaux, il y a tangence entre la surface cylindrique de l'extrémité d'une palette et le fond de l'échancrure, lequel est également cylindrique et concentrique à son arbre. On voit donc que la séparation de la chambre d'aspiration d'avec la chambre de refoulement ne cesse à aucun instant. Il ne faut pas croire, du reste, que l'arête du bord de la palette suive *exactement* et *jointivement* pendant la révolution le bord épicycloïdal de l'échancrure. La paroi de l'échancrure est, au contraire, brute de fonte; et il y a *beaucoup de jeu* à l'introduction et à la sortie de la palette dans la chambre du rouleau échancré; de telle sorte qu'une certaine usure peut se produire aux engrenages sans amener un dérangement assez grand dans les positions angulaires respectives des deux axes pour qu'aucun accident ni inconvénient grave puisse en résulter.

Les points les plus caractéristiques de cette pompe sont : 1° le soin avec lequel ont été étudiées les sections offertes au passage de l'eau, tant du côté de l'aspiration que du côté du refoulement; 2° la constance absolue des effets du piston (ou palette). En ce qui concerne le premier point, les sections sont telles, qu'une molécule d'eau traversant l'appareil y conserve une vitesse sensiblement constante et uniforme, ce qui exclut toutes pertes de travail dues à l'inertie. A cet effet, dans les moments où les sections d'afflux ou d'échappement offertes à l'eau, entre les organes en mouvement, décroissent et tendent à nécessiter, par suite, une accélération des filets liquides, ceux-ci trouvent, par des poches latérales ménagées aux couvercles, des issues supplémentaires.

En ce qui concerne le second point, dans les moments où il n'y a point aspiration ou refoulement par l'une des palettes du rouleau principal, cet effet est produit par le bec du rouleau échancré; et comme la projection de celui-ci sur un plan radial passant par son axe de symétrie est rigoureusement égale à celle de la palette, l'*intensité* de l'action (si nous pouvons nous exprimer ainsi) reste absolument constante. *Ce n'est que dans les moments* où le rouleau échancré supplée ainsi au rouleau à palette qu'il travaille réellement; et l'on comprend donc la nécessité indiquée plus haut des engrenages alternés.

Il résulte de cette continuité d'effet de la pompe une augmentation très notable d'effet utile. Il résulte également de cette suppression des intermittences et effets d'inertie, la possibilité de marcher à des vitesses très réduites ou très considérables, à volonté, et de varier pour un même appareil dans de très grandes limites la vitesse de rotation, le débit réalisé et le travail dépensé, sans que l'effet utile subisse de trop grandes variations.

La pompe Greindl aspire et refoule les gaz aussi bien que les liquides; elle est insensible aux rentrées d'air et s'amorce d'elle-même. Elle peut comprimer l'air à 6 atmosphères et faire un vide de $0^{mm},70$ de mercure, Son rendement est de 80 à 95 p. 100, les chiffres les plus forts correspondant aux faibles hauteurs d'élévation.

Voici un tableau des conditions d'installation de ces appareils :

TYPES.	DÉBIT en litres par minute.	NOMBRE de tours par minute du rouleau à palettes.	DIAMÈTRE des tuyaux d'aspiration et de refoulement.	VITESSE de l'eau dans les tuyaux par seconde.	PERTE de charge par mètre de longueur de conduite.	PERTE de charge à chaque coude droit.	POIDS de la crépine avec clapet de retenue.	POIDS approximatif de la pompe
0	50	200	0,050	0,424	0,00558966	0,009150	12	105
1	150	200	0,070	0,649	0,00901383	0,021467	15	225
2	300	180	0,090	0,786	0,01042164	0,039556	18	335
3	550	180	0,105	1,058	0,01552977	0,057048	31	520
4	1000	170	0,140	1,082	0,01217005	0,059668	54	790
5	1500	170	0,170	1,101	0,01036980	0,061783	93	1,100
6	2500	160	0,225	1,050	0,00731100	0,061213	125	1,720
7	3500	150	0,250	1,190	0,00835665	0,075586	150	2,300
8	4500	130	0,280	1,218	0,00767272	0,075586	180	3,700
9	6000	110	0,325	1,205	0,00652864		200	5,000
10	8000	95	0,360	1,310	0,00646650			
11	10000	80	0,400	1,325	0,00638104			
12	12500	75	0,450	1,310	0,00543190			
13	15000	70	0,500	1,270	0,00470720			
14	20000	65	0,560	1,314	0,00411105			

326. Méthode de Greindl pour l'étude d'une pompe quelconque. On trace *trois diagrammes sur les mêmes abscisses.* Sur l'axe des abscisses, on porte à une certaine échelle le chemin parcouru en un tour complet par la partie moyenne de l'organe propulseur de la pompe (piston, palette ou autre). On divise ce chemin total en un nombre plus ou moins grand de parties égales (ou inégales) suivant qu'il y a intérêt à considérer un plus ou moins grand nombre de positions respectives des divers organes de la pompe, et par les points de division on élève des ordonnées indéfinies. Cela fait, il ne reste plus qu'à porter sur ces ordonnées des longueurs convenables pour obtenir les points correspondants des trois diagrammes de refoulement, d'aspiration et de travail; et voici comment ces longueurs se déterminent :

Pour le diagramme de refoulement ou de débit, on porte en ordonnée, à une échelle convenue, pour chaque position une longueur proportionnelle au débit par seconde à l'instant considéré, c'est-à-dire au débit géométrique, ou volume *engendré par seconde en cet instant* par l'organe ou par l'ensemble des organes propulseurs.

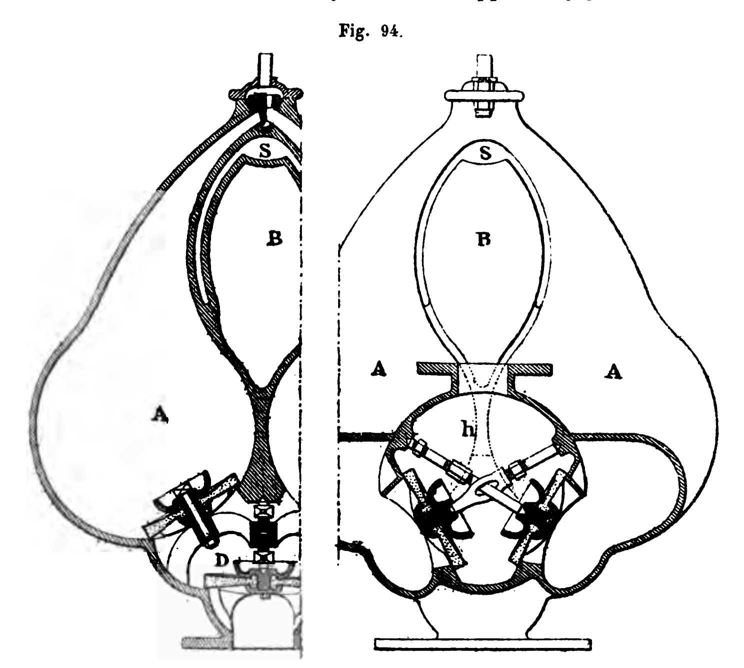
Pour le diagramme d'aspiration on porte en ordonnée pour chaque position une longueur proportionnelle au débit par seconde, à l'instant considéré *du côté de l'aspiration.* Il semblerait au premier abord que le diagramme doit se confondre avec le précédent, mais il n'en est rien. En effet, contrairement à ce qui a lieu pour la colonne de refoulement, la pression motrice de la colonne d'aspiration dépend non plus seulement du mouvement de l'organe propulseur, mais aussi du mouvement de l'eau dans cette colonne. Elle peut se trouver réduite à zéro, si pour un motif quelconque l'eau ne peut pas suivre l'organe propulseur dans son avancement. En effet, dans la conduite d'aspiration, le mouvement de l'eau est dû uniquement à la pression atmosphérique, et si

à un moment donné l'eau est réduite au repos ou ralentie, elle ne pourra reprendre son mouvement ou acquérir une accélération que d'après une certaine loi distincte de celle du mouvement de l'organe propulseur. C'est ce qui fait qu'il faut éviter *d'installer des pompes avec de grandes hauteurs d'aspiration*, lorsque l'on peut s'en dispenser, parce que l'on réduit alors à rien la charge produisant le mouvement dans le tuyau d'aspiration (indépendamment des effets fâcheux résultant du dégagement de l'air dissous dans l'eau).

Pour le troisième diagramme, on porte en ordonnée, en chaque point de l'échelle convenue, la résultante en kilogrammes des pressions s'exerçant au point considéré sur la partie moyenne de l'organe propulseur. Ces pressions ne dépendent pas seulement des hauteurs d'aspiration et de refoulement, mais aussi de la vitesse variable avec laquelle on force l'eau à sortir des espaces dans lesquels on l'a confinée, vitesse dont l'exagération conduit, dans certains cas, à des pressions de beaucoup supérieures à celle qui résulte de la hauteur de refoulement. Le travail développé pour un tour est alors exprimé par l'aire du diagramme, et le rapport du travail utile théorique à cette aire exprime le rendement théorique.

327. Pulsomètre de M. Henry Hall. Cet appareil (*fig.* 94), qui figu-

Fig. 94.



rait pour la première fois à l'Exposition de 1878, peut être rattaché aux pompes. En voici la description, d'après M. L. Poillon, ingénieur (*Semaine des Constructeurs*, vol. III) :

« Supposez un corps de pompe sans piston, plongeant par le bas dans l'eau et portant un clapet d'aspiration un peu au-dessus du niveau de l'eau. Placez sur le côté un clapet de refoulement avec un tuyau correspondant, le haut dudit corps de pompe étant fermé et communiquant avec un tuyau de vapeur muni d'un robinet. Remplissez le corps de pompe de vapeur et fermez votre robinet : il est clair que la vapeur emprisonnée là dedans va se condenser en partie, déterminant ainsi un vide partiel. L'eau de la nappe inférieure montera donc dans le corps de pompe en soulevant le clapet d'aspiration, en vertu de la pression atmosphérique, et finira par le remplir complètement en condensant toute la vapeur primitivement contenue. A cet instant, tournez le robinet de vapeur : aussitôt la vapeur viendra faire pression sur le liquide et l'expulsera par le tuyau de refoulement en s'y condensant en faible partie et remplissant de nouveau le corps de pompe. Répétez périodiquement l'ouverture et la fermeture du robinet, et vous voyez immédiatement que vous avez un moyen d'élever de l'eau par des pressées de vapeur successives, que nous pourrons qualifier de *pulsations* ou battements.

« Au lieu d'un seul corps de pompe, mettez-en deux, l'un à côté de l'autre, en réunissant leurs aspirations et leurs refoulements. Au lieu de laisser ces corps de pompes cylindriques, donnez à chacun la forme d'une demi-poire A, A, les gros bouts étant en bas. Vers le bout S (queue de la poire), supposez un tuyau de vapeur unique vertical, envoyant un embranchement à chaque ventricule ou compartiment; et au lieu d'un robinet à chaque embranchement, supposez une soupape voyageant de l'une à l'autre de telle façon que chaque ventricule soit alternativement ouvert et fermé à l'arrivée de la vapeur, tout cela vous donnera l'appareil représenté figure 94. Voilà le pulsomètre trouvé; et tandis qu'un ventricule se remplit d'eau, la vapeur agit dans son voisin pour expulser par le refoulement l'eau introduite un instant auparavant. Puis la soupape revient fermer l'introduction de vapeur sous l'influence de la condensation partielle éprouvée par celle-ci; et ainsi de suite. Les mêmes effets se reproduisent périodiquement, et les *pulsations* subordonnées au mouvement de la soupape se succèdent, plus ou moins rapides, suivant la pression de la vapeur, la lenteur d'aspiration, celle de refoulement, etc. »

Notre figure 94 donne, à droite, une coupe de la partie intérieure, indiquant la chambre et les clapets de refoulement; à gauche sont indiqués les clapets d'aspiration et le clapet de pied D.

« On ne peut rien concevoir de plus simple : un appareil en fonte brute avec des clapets faciles à visiter, quelques bouts de tuyau et un jet de vapeur: et c'est tout. Vous suspendez cela à une chaîne ou à ce que vous voulez, et vous supprimez à la fois une partie de la dépense d'acquisition et la plus grande partie des frais d'installation. Pour assécher un puits de mine, une carrière, une cave, et pour faire, en général, n'importe quel travail répondant à des besoins momentanés, *rien de mieux*. Pour un service fixe devant fonctionner à demeure, les avan-

tages de simplicité et d'économie disparaissent, au contraire, devant l'exagération de la dépense journalière de vapeur et de combustible. Dans un tel appareil, la vapeur travaille sans détente, et une partie notable se condense en pure perte. Des expériences ont prouvé qu'un pulsomètre consomme deux ou trois fois plus de vapeur qu'il n'en faut pour actionner une pompe. Cela n'empêche pas le pulsomètre d'être d'un emploi commode dans des cas spéciaux.

« Plus il s'agit de refouler haut, et plus il convient d'employer de la vapeur à une pression élevée, puisque c'est la pression de la vapeur qui expulse l'eau par le tuyau de refoulement; mais plus, en même temps, il convient de diminuer la hauteur d'aspiration puisque, avec l'augmentation de la pression de la vapeur, le vide dans la chambre d'aspiration ne s'établit qu'avec plus de difficulté et à un degré moindre. Il convient, dans la plupart des cas, d'aspirer le moins possible et de ne jamais dépasser 3 ou 4 mètres comme maximum de hauteur d'aspiration, sous peine de voir diminuer rapidement le nombre des pulsations et le travail, et augmenter au contraire les condensations et les pertes. Le pulsomètre est pour certaines applications un appareil *préférable à tout autre* comme s'installant avec beaucoup moins de frais, dans un emplacement beaucoup moindre, avec beaucoup plus de rapidité, et comme fonctionnant sans aucune surveillance et sans détériorations graves possibles. Mais ce serait une grave erreur de monter un pulsomètre pour un service de longue durée et pour une installation définitive, parce que l'on dépenserait par jour le triple au moins de la quantité de combustible normalement nécessaire, et ce en vertu du *principe même* de l'appareil, sans que les perfectionnements de détail y pussent rien changer. »

328. Presse hydraulique. Quoique cette machine ne soit pas employée à élever l'eau, sa manière de fonctionner lui fait prendre place à côté des pompes. La pression théorique que peut transmettre le plateau fixé au grand piston d'une presse hydraulique est :

$$Q = \frac{PLD^2}{ld^2}.$$

Q pression transmise;
P force motrice; un homme agissant sur un levier sans faire usage du poids de son corps donne moyennement $P = 25$ kilogr., et même 50 kilogr. si le travail n'est que d'un instant;
L bras de levier de la puissance P, ou distance du point d'application de cette force à l'axe de rotation de son levier;
D diamètre du grand piston;
d diamètre du petit piston;
l bras de levier de la résistance qu'oppose le petit piston au mouvement du levier de la puissance P; cette résistance est égale à la pression de l'eau sous le petit piston, ou encore à $P\frac{L}{l}$.

Supposant $P = 25$ kilogr., $L = 1$ mètre, $D = 0^m,20$, $l = 0^m,03$ et $d = 0^m,03$,

on a :

$$Q = \frac{25 \times 1 \times 0,04}{0,03 \times 0,0009} = 37037 \text{ kil.}$$

Les diverses résistances passives de la machine, et surtout le frottement de la garniture, font que la pression réelle Q′ qu'on peut obtenir dans la pratique n'est que les 0,80 de Q pour des efforts modérés; elle atteint les 0,85 de Q pour les grands efforts.

Le rapport de la vitesse du grand piston à celle du petit est égal au rapport inverse des sections ou des carrés des diamètres de ces pistons; pour l'exemple précédent, ce rapport est donc $\frac{d^2}{D^2} = \frac{0,0009}{0,04} = \frac{9}{400}$.

Les pistons sont pleins et ils se meuvent dans un stuffing-box ordinaire dont les étoupes sont remplacées par des rondelles de cuir; la garniture du grand piston a 0^m,04 de hauteur, et il convient, afin de la rendre bien étanche, de la disposer de manière que non seulement la pression du stuffing-box l'applique, en l'élargissant, contre le piston et le renflement du corps de pompe, mais aussi qu'elle fasse fermeture autoclave.

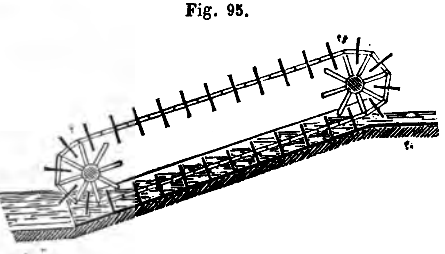
On se rendrait compte du frottement de la garniture des pistons à l'aide de la première formule du n° 61, dans laquelle on ferait $f = 0,23$.

Dimensions des presses à fourrage employées en Algérie et construites à Liverpool, ainsi que de celles qui ont servi à élever les tubes du pont Britannia.

	Algérie.	Britannia.
Diamètre D du piston	0^m,2795	0^m,510
Diamètre intérieur du corps de pompe	0 ,3090	0 ,560
Épaisseur de la fonte	0 ,1515	0 ,153
Pression intérieure sur un centimètre carré	1078^k,7	569^k,7
Pression sur toute la surface du piston	660 140^k	1 161 500^k
Effort de rupture des cylindres par millimètre carré	12^k,26	6^k,83

La fonte travaillant à une charge voisine de celle de rupture (202), elle n'a résisté que parce qu'on l'a obtenue par un mélange de fontes choisies, et encore un cylindre d'Algérie s'est rompu brusquement de haut en bas.

Fig. 95.

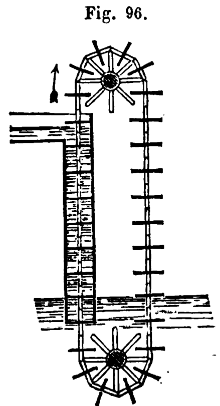


329. Chapelet incliné. Cette machine se compose d'une série de palettes rectangulaires fixées à une chaîne sans fin, et se mouvant de bas en haut dans une auge en bois inclinée de 30° à 40° à l'horizon. Cette auge plonge dans le puisard et s'élève jusqu'à la hauteur à laquelle il convient de monter l'eau.

Le jeu laissé entre les bords latéraux des palettes et les parois de l'auge est de $0^m,005$ à $0^m,006$ environ. Pour une même section de palette, le développement de la partie de son contour en contact avec l'auge est minimum, ainsi que la quantité d'eau qu'elle laisse échapper, quand sa hauteur est moitié de sa longueur; cependant, dans la pratique, la hauteur est quelquefois les 4/5 de la longueur. L'écartement des palettes varie de 1 fois à 1 fois 1/2 leur hauteur, et leur vitesse, de 1 mètre à $1^m,50$ par seconde, en se rapprochant habituellement de $1^m,50$.

Un homme exerçant sur une manivelle un effort de 8 kilogr. avec une vitesse de $0^m,75$ par seconde peut produire, en 8 heures, un effet utile moyen équivalant à 80 ou 90 mètres cubes d'eau élevés à 1 mètre de hauteur, mais on ne doit compter, en général, que sur un effet utile égal aux 0,40 du travail dépensé; ce faible rendement fait que cette machine, qui a encore l'inconvénient d'être encombrante, est à peu près abandonnée.

Fig. 96.



330. Chapelet vertical. Cette machine ne diffère de la précédente qu'en ce que l'auge inclinée est remplacée par un tuyau vertical, appelé *buse*, à section carrée ou cylindrique. Les palettes ont la même forme et de $0^m,13$ à $0^m,16$ de côté ou de diamètre; leur jeu dans la buse est moins grand que pour les chapelets inclinés, et, afin de diminuer encore les pertes d'eau, on rend ce jeu le plus petit possible au bas de la buse, en y plaçant un tuyau métallique bien dressé, de la section des palettes et d'une longueur excédant un peu la distance de deux palettes consécutives. Souvent les palettes sont formées d'une rondelle en cuir gras serrée entre deux plaques de tôle; cette rondelle fait garniture et rend les pertes d'eau aussi petites que possible.

Le chapelet vertical convient surtout pour les épuisements où il faut élever l'eau à plus de 4 mètres de hauteur. La longueur de la buse est en général comprise entre 4 et 6 mètres.

On emploie de 4 à 8 hommes appliqués à des manivelles de $0^m,40$ de rayon et faisant de 20 à 30 tours par minute pour manœuvrer un chapelet vertical. Ces hommes travaillant 8 heures par jour, et par relais de 2 heures, produisent chacun un effet utile journalier équivalant à 110 ou 120 mètres cubes d'eau élevés à un mètre.

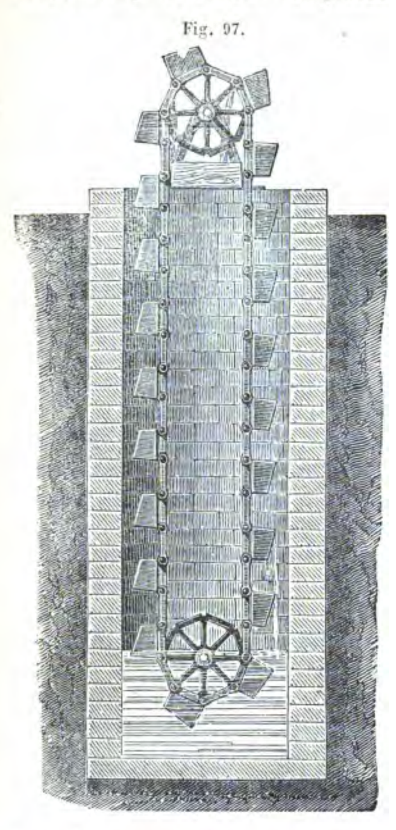
En général, on peut compter que l'effet utile moyen est égal aux 0,65 de l'effet dépensé, et que la quantité d'eau élevée est les 5/6 de l'eau d'abord puisée.

Les chapelets peuvent être mus non seulement par des hommes, mais aussi par des chevaux à l'aide d'un manège, et même par des roues hydrauliques et des machines à vapeur.

331. Noria. Cette machine n'est qu'un chapelet vertical dans lequel la

buse et les palettes sont remplacées par des seaux fixés à une chaîne sans fin, et dont la capacité est ordinairement de 7 à 8 litres, et va quelquefois à 15 litres. Dans une noria, afin que les seaux puissent se vider, on est obligé de monter l'eau à un niveau supérieur à celui auquel on veut l'élever; de là il résulte que pour obtenir un travail utile Ph, on est obligé, abstraction faite des différentes résistances passives, de produire un travail :

Fig. 97.



$$P(h + h').$$

P poids d'eau élevé;
h hauteur à laquelle on veut élever l'eau.
h' excès de hauteur auquel on est obligé d'élever l'eau pour que les seaux versent à un niveau convenable; sa valeur est ordinairement égale à $0^m,75$; c'est le rayon du cercle circonscrit à l'hexagone qui sert de tambour, augmenté de $0^m,10$ à $0^m,20$.

La valeur de h' restant constante, quelle que soit celle de h, le rapport de l'effet utile au travail dépensé augmente à mesure que la hauteur h est plus grande ; c'est du reste ce que confirment les résultats pratiques du tableau suivant, obtenus avec une noria dans laquelle on avait $h' = 0^m,75$. La machine était mue par de forts ouvriers produisant sur des manivelles un effort de 9 kilogr. avec une vitesse de $0^m,75$ à $0^m,80$ par seconde.

Valeur de h.	Rapport de l'effet utile à l'effet dépensé.
$1^m,00$ à $2^m,00$	0,48
2 ,50 à 2 ,60	0,57
3 ,00 à 3 ,30	0,63
3 ,60 à 4 ,00	0,66

Une noria établie par Abadie, près de Toulouse, a pour tambour une lanterne à 6 fuseaux en fer de $0^m,03$ de diamètre; ces fuseaux sont espacés de $0^m,45$ et relient deux plateaux en fonte dont l'écartement est de $0^m,43$. L'axe du tambour est en fer, et a $0^m,054$ d'équarrissage. La chaîne a $13^m,72$ de longueur, et elle est formée de 28 chaînons portant chacun un seau en feuilles de cuivre de 15 litres de capacité.

La surface du bassin qui reçoit l'eau est à 0m,07 au-dessous de l'axe du tambour, et à 5m,13 au-dessus du niveau de l'eau dans le puisard. Un cheval ordinaire de jardinier fait fonctionner cette machine, et produit un effet utile équivalent à 118 mètres cubes d'eau élevés à 1 mètre de hauteur par heure; admettant, avec d'Aubuisson, que dans ce même temps le travail produit par un cheval attelé à un manège équivaut à 144 mètres cubes d'eau élevés à 1 mètre, l'effet utile est donc les 0,82 du travail dépensé.

D'après Navier, une noria manœuvrée par deux chevaux aurait élevé 70mc,12 d'eau à 3m,60 de hauteur, ce qui équivaut à 126 mètres cubes à 1 mètre par cheval; l'effet utile serait donc les 0,88 du travail dépensé. Il convient de ne compter que sur un effet utile égal aux 0,70 ou 0,80 du travail dépensé.

Pour les hauteurs h de 4 mètres et au-dessus, Navier a proposé de calculer le rendement des norias par la formule :

$$0,80 \frac{h}{+ 0,75h}.$$

Outre l'effet utile considérable rendu par la noria, elle a encore l'avantage de pouvoir servir à élever les eaux bourbeuses, comme le sont généralement les eaux d'épuisement, ce qui est impossible avec les chapelets.

Par suite du balancement, les seaux perdent une quantité d'eau nommée *baquetage*, et estimée à 0,1 environ de la capacité des seaux.

332. Roues élévatoires. Ces roues, qui sont à palettes planes, agissent à la manière des chapelets (329), mais en se mouvant dans un coursier circulaire. Elles sont très convenables pour élever l'eau à des hauteurs qui n'excèdent pas 3 à 4 mètres. Leur vitesse à la circonférence extérieure ne doit pas dépasser 1 mètre. Le rendement ne doit pas être estimé à moins de 0,70 ou 0,75.

Dimensions des parties principales de la roue élévatoire, établie pour élever les eaux de la Seine dans la gare de Saint-Ouen :

Diamètre extérieur de la roue	10m,672
Diamètre intérieur	10 ,672 — 1m,648 = 9m,024
Longueur des aubes	1 ,216
Hauteur des aubes, mesurée suivant ces aubes, qui sont un peu inclinées sur le rayon.	0 ,90
Hauteur des aubes, mesurée suivant le rayon . . .	0 ,824
Nombre d'aubes.	36

D'après des observations anciennes faites par Walter de Saint-Ange cette roue élèverait 2500 mètres cubes d'eau à 4 mètres de hauteur en une heure; la force de la machine étant supposée être de 45 chevaux, le rapport de l'effet utile à l'effet dépensé serait de 0,82; mais il eût été convenable d'évaluer exactement la force de la machine.

333. Roues à seaux ou à godets. Ces roues, employées fréquemment aux irrigations et aux usages domestiques à cause de leur grande simplicité et de leur peu d'entretien, sont à aubes planes, dont un plus ou moins grand nombre portent des coffres fermés aux deux extrémités,

et garnis sur une face d'une ouverture qui permet l'entrée et la sortie de l'eau. Par le mouvement de la roue, les coffres puisent successivement l'eau dans le courant moteur même, et viennent la verser dans une auge placée latéralement vers le sommet de la roue.

Les coffres, à moins de régler convenablement leur ouverture, perdent toujours à leur sortie du courant une partie de l'eau d'abord puisée; de plus, le versement ne s'opère qu'à un niveau supérieur au point auquel on doit élever l'eau. C'est afin d'atténuer autant que possible ces causes de pertes d'effet utile que, dans l'application de ces roues aux grands épuisements, on a remplacé les coffres fixés aux aubes par des seaux ou godets mobiles autour d'un axe placé au-dessus de leur centre de gravité; par cette disposition, les godets ne perdent leur eau qu'au sommet de la roue, où un taquet les fait verser.

Comme, pour les épuisements, l'eau élevée n'est pas prise dans le courant moteur, les godets sont montés sur une roue séparée de la roue motrice et formée de deux plateaux suffisamment écartés pour que les godets puissent être suspendus entre eux. Perronnet a appliqué avec beaucoup de succès une machine semblable aux fondations du pont de Neuilly. Le diamètre de la roue motrice était de 5^{m},85, la longueur des aubes 6^{m},50, la hauteur des aubes 0^{m},97, et le diamètre des roues à godets 5^{m},36. La roue à aubes avait été placée en un point fixe où la vitesse du courant était de 0^{m},81, et la roue à godets a été successivement portée sur les emplacements des diverses piles jusqu'à une distance de 35 mètres. La capacité de chacun des seize godets montés sur la roue était de 137 litres; mais la quantité d'eau qui arrivait au point de versement n'était que de 103 litres. La quantité d'eau élevée à 3^{m},25 et 3^{m},90 de hauteur était de 185 mètres cubes par heure; c'est le même effet utile que celui fourni par douze chapelets verticaux employés au même pont.

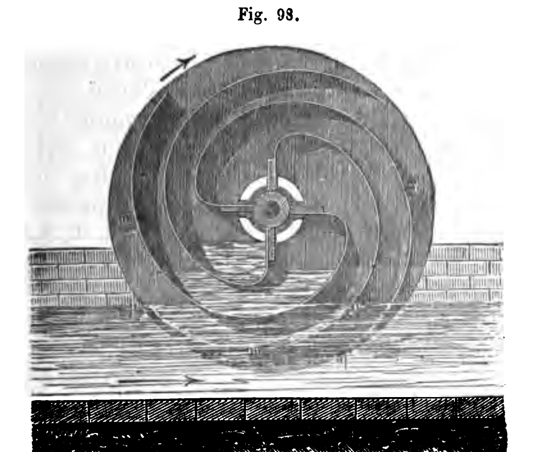
Le diamètre d'une roue à seaux ou à godets peut atteindre de 6 à 8 et même 10 mètres. Considérée comme roue élévatoire, sa vitesse varie de 0^{m},20 à 0^{m},40, suivant son diamètre, et son rendement peut être de 0,60 à 0,65.

334. Tympan. La machine de ce nom employée par les anciens était simplement un tambour en bois divisé en huit ou en un plus grand nombre de compartiments, par des cloisons dirigées suivant le rayon. Chaque compartiment portait, sur le contour du tambour, une ouverture qui permettait à l'eau d'entrer dans le compartiment quand cette ouverture était noyée. Comme cette ouverture était placée sur la partie de la paroi convexe du tambour qui sortait la première de l'eau, une certaine quantité d'eau se trouvait emprisonnée, et le tambour en tournant l'élevait jusqu'à la hauteur de son axe. Des rainures pratiquées suivant la longueur de l'axe et se prolongeant dans l'un des fonds du tambour formaient des canaux qui permettaient à l'eau de sortir.

Lafaye, au commencement du siècle dernier, a imaginé de courber les cloisons suivant les développantes du cercle extérieur de l'axe (*Int.* 1237), ce qui a permis de supprimer l'enveloppe convexe du tam-

bour. Par cette disposition, la verticale passant par le centre de gravité de la masse d'eau contenue dans chaque canal courbe est tangente à l'axe, et, quelle que soit la position du tympan, le rayon de son axe est le bras de levier constant de la résistance; d'où il résulte que le travail est aussi régulier que possible. D'après des expériences de Perronnet, un de ces tympans, ayant $5^m,85$ de diamètre, portant 24 cloisons, plongeant de $0^m,24$ dans l'eau et faisant deux tours et demi par minute, élevait 123 mètres cubes d'eau à $2^m,60$ par heure. Comme la machine était mue par douze hommes marchant sur une roue à cheville montée sur son axe, le travail utile était équivalent à $26^{mc},66$ d'eau élevés à 1 mètre de hauteur par heure et par homme, et le rendement était de 0,85 environ (37). Avec un chapelet vertical, manœuvré, il est vrai, à l'aide de manivelles (37), l'effet utile n'a été que l'équivalent de $17^{mc},40$ d'eau élevés à 1 mètre de hauteur par heure et par homme. Le tympan qui peut être mû par un manège, une roue hydraulique ou une machine à vapeur, a l'inconvénient de n'élever l'eau qu'à la hauteur de son axe; ce qui oblige de lui donner des dimensions qui le rendent lourd et embarrassant.

Fig. 98.



Anciennement, Cavé a construit plusieurs tympans de très grandes dimensions, complètement en tôle de $3^{mm},5$ environ d'épaisseur rivée sur des cornières en fer, avec arbre en fer ou en fonte. Ils ont été employés avec succès, à Paris, pour les épuisements qu'a nécessités la construction de l'écluse de la Monnaie.

Cavé a fait des tympans à 4 cloisons courbées en spirale d'Archimède; mais les derniers sont à 2 cloisons, et les spires se rapprochent du centre plus rapidement que dans la spirale, assez pour que la surface de l'eau qui est emprisonnée reste constamment tangente à la spire supérieure. Un de ces tympans à deux spires, fonctionnant dans de bonnes conditions, avait les proportions suivantes :

Plus grand rayon	$3^m,50$
Largeur intérieure.	1 ,00
Plus courte distance de l'extrémité de chaque spire à la spire voisine.	0 ,75
Diamètre des ouvertures laissant sortir l'eau.	1 ,00
Profondeur à laquelle la roue plonge	1 ,00

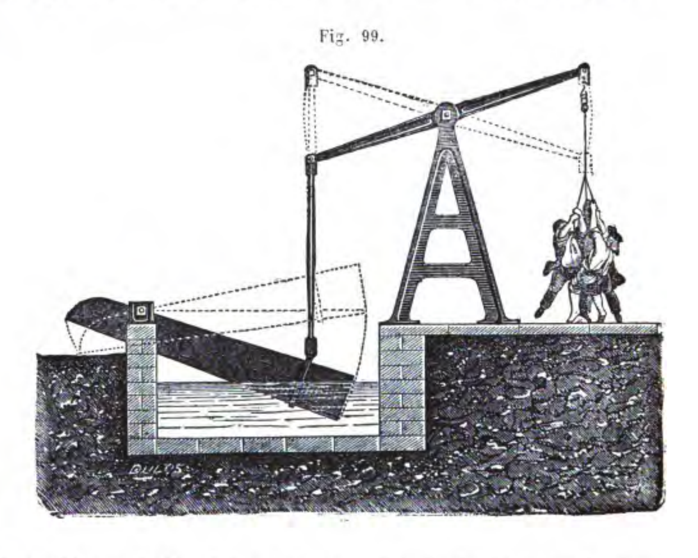
Nombre de révolutions de chaque spire.	2
Mètres cubes d'eau puisés par chaque spire pour un tour.	2
Nombre de tours par minute	10
Mètres cubes d'eau élevés par heure	2400
Hauteur à laquelle l'eau est élevée, environ.	$2^{m},00$

Pour un débit aussi considérable, on fait verser l'eau par les deux joues du tympan, lequel, au lieu de plonger de 1 mètre, plonge souvent de $1^{m},20$ à $1^{m},30$, ce qui augmente considérablement le volume d'eau élevé. Ainsi, d'après le constructeur Cavé, le tympan faisant de 10 à 12 révolutions par minute, ce volume aurait été de 3333 mètres cubes par heure, à la hauteur de 2 mètres environ, pour une puissance moyenne de 30 chevaux; ce qui correspond à un rendement de 0,82.

335. Baquetage à bras. Des épuisements de peu de durée, et qui doivent être faits de suite, s'exécutent quelquefois à l'aide de seaux ou baquets manœuvrés par des hommes et placés dans le bassin à mettre à sec. D'après Perronnet, un homme qui travaille 8 heures par jour peut élever 46 mètres cubes d'eau à 1 mètre de hauteur, ce qui revient à un travail utile de $46\,000^{km}$ en une journée de 8 heures. Ce résultat paraît devoir être adopté, quoiqu'il puisse être diminué ou augmenté selon la force et l'ardeur des travailleurs. Cette main-d'œuvre étant pénible, il convient de limiter la hauteur d'élévation de l'eau à 1 mètre ou $1^{m},30$.

On estime qu'en faisant usage d'une *écope* un homme peut élever 48 mètres cubes d'eau à 1 mètre de hauteur dans sa journée de 8 heures. Des expériences faites à Auxonne ont donné 60 mètres cubes.

Fig. 99.



Avec l'écope hollandaise, (*fig.* 99), d'après Bélidor, un homme élève 120 mètres cubes d'eau à 1 mètre de hauteur dans une journée de travail de 8 heures. Comme on le voit, cette machine est très avantageuse;

mais on ne peut l'employer que pour élever de grands volumes d'eau à des hauteurs qui ne peuvent guère dépasser 1 mètre.

336. Seau à bascule. Lorsqu'on n'a à élever, dit d'Aubuisson, qu'une petite quantité d'eau de 5 à 6 mètres de profondeur, pendant une ou deux heures de la journée, on emploie avec avantage un seau suspendu par une perche à l'une des extrémités d'un grand balancier en bois, à l'autre extrémité duquel on place un poids faisant équilibre à la charge. De cette manière, un homme, selon l'habitude qu'il a de ce genre de travail, produit un effet équivalent à 12 ou 15 et même 20 mètres cubes d'eau élevés à 1 mètre de hauteur par heure.

Navier estime qu'en travaillant avec une telle machine pendant 12 heures, un homme pourrait produire un travail équivalant à 70 mètres cubes d'eau élevés à un mètre de hauteur, en supposant toutefois qu'il puise l'eau à 4 ou 5 mètres de profondeur. Morin dit que, dans les circonstances les plus favorables, le travail journalier atteint difficilement 60 000^{km}. C'est surtout quand la profondeur n'est que de 2 à 3 mètres, qu'il peut être impossible d'obtenir un tel résultat.

337. Seau manœuvré à l'aide d'un treuil. Lorsque la profondeur du puits est considérable, on fait usage d'une corde, à chacune des extrémités de laquelle est fixé un seau, et s'enroulant sur le treuil dont il a été parlé au n° 124. D'Aubuisson, d'après ses observations et des résultats donnés par Coulomb, admet que le treuil étant manœuvré par des hommes agissant sur des manivelles, chaque homme produit, dans un travail journalier de 8 heures, un effet utile de 160 000^{km}.

Lorsque la corde passe seulement sur une poulie, et qu'elle est directement tirée à main d'homme, d'après Coulomb, l'effet utile journalier n'est que de 71 000^{km}.

338. Manège du maraîcher. Cette machine, qui a la plus grande analogie avec la précédente, se compose d'un tambour fait généralement avec deux vieilles roues de voitures, espacées de 1 mètre à 1^{m},30 environ et sur le pourtour desquelles on a fixé des douves de tonneau allant de l'une à l'autre sans être parallèles à l'axe, ce qui donne une espèce d'hyperboloïde de révolution, qui empêche la corde de s'échapper, tout en donnant un treuil régulateur. Ce tambour est monté sur l'arbre vertical d'un manège, qu'on maintient par une charpente qui sert en même temps à fixer sur le puits deux poulies sur lesquelles viennent passer les deux brins de la corde.

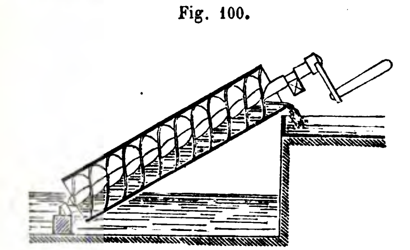
Hachette rapporte, dans son *Traité des machines*, qu'avec un manège de maraîcher, établi sur un puits de 32^{m},50 de profondeur, un cheval élevait par minute un seau contenant 90 litres d'eau, d'où il résulte que pour 8 heures de travail l'effet utile serait de 1 404 000^{km}. On admet qu'avec les manèges de maraîchers les plus simples un homme peut produire en 8 heures un travail journalier équivalant à 200 mètres cubes d'eau élevés à 1 mètre, un cheval ou un mulet 1 166 mètres cubes, un bœuf 1 120, et un âne 334.

339. Vis d'Archimède. La vis d'Archimède se compose d'un cylindre creux servant d'enveloppe générale à toute la machine qui est constituée

par une surface hélicoïdale; c'est-à-dire qu'il suffit de concevoir une hélice tracée sur le cylindre enveloppant et de faire mouvoir une droite s'appuyant, d'une part, sur cette hélice et, d'autre part, sur l'axe du cylindre en restant perpendiculaire à ce dernier. Cette droite engendre ainsi une surface hélicoïde qui, dans la machine, est constituée par des planches minces. En imprimant un mouvement de rotation à l'appareil, l'eau glisse sur les spires comme elle ferait sur un plan incliné et s'élève.

Dans les vis ordinaires employées aux épuisements, on place trois hélices équidistantes sur le même noyau (*Int.* 1259). Le diamètre extérieur des hélices est égal à trois fois celui du noyau, et il varie entre $0^m,325$ et $0^m,65$. La longueur de la vis varie entre douze et dix-huit fois le diamètre extérieur des hélices, selon que ce diamètre est plus ou moins fort.

Fig. 100.



Les constructeurs de Paris font ordinairement égal à 60° l'angle de la tangente à l'hélice tracée sur le noyau avec la génératrice de ce noyau; les anciens Romains le faisaient de 45°; à Toulouse, on l'a pris de 54° environ, et Eytelwein l'a fait de 78° dans une petite vis de construction soignée, destinée à faire des expériences.

L'inclinaison de l'axe de la vis avec l'horizon peut varier de 30° à 45°, et la vis fonctionne le plus avantageusement lorsque le niveau de l'eau s'élève un peu au-dessus du centre de la base du noyau, sans immerger complètement cette base.

Résultats obtenus par Lamandé, avec une vis d'Archimède :

Longueur de la vis	$5^m,85$
Diamètre extérieur.	$0\ ,49$
Inclinaison de la vis à l'horizon	35°
Nombre de tours de la vis par minute	40
Hauteur à laquelle l'eau était élevée.	$3^m,30$
Quantité d'eau élevée à $3^m,30$ par heure	45^{mc}

Comme la vis était manœuvrée par deux compagnies de chacune neuf hommes, travaillant par relais de deux heures, l'effet produit était donc équivalent à $16^{mc},50$ d'eau élevés à 1 mètre de hauteur par heure et par homme. Comme la durée du travail journalier n'était que de cinq heures, on voit qne l'effet utile journalier était très faible.

On peut admettre qu'un ouvrier manœuvrant une vis d'Archimède bien disposée peut produire un effet utile équivalant à 15 mètres cubes d'eau élevés à 1 mètre de hauteur par heure et travailler six heures par jour; il peut même travailler huit heures sur vingt-quatre si l'épuisement est continu et les relais bien disposés.

En Hollande et en Allemagne, on remplace souvent le canon, c'est-à-dire l'enveloppe extérieure des hélices, par un coursier demi-circulaire fixe. Par cette disposition, le poids du canon et celui de l'eau qui se

trouve dans la vis ne reposent plus sur les pivots, et ne tendent pas à produire directement la flexion du noyau; mais il faut marcher avec une grande vitesse, pour que la perte d'eau entre les hélices et le coursier ne soit pas considérable. Ces machines sont presque toujours mues par des moulins à vent.

340. Machines d'épuisement mues à bras ou par locomobiles. Les résultats suivants ont été obtenus en 1851 par MM. Morandière et Compaing, sur les chantiers du chemin de fer de Tours à Bordeaux (*Annales des ponts et chaussées*, 1857). La machine employée était d'une force nominale de 7 chevaux, à haute pression, sans condensation. Sa forme était celle d'une petite locomotive; la chaudière était à 24 tubes un peu plus gros que ceux des locomotives ordinaires; le cylindre était extérieur. Le volant que la bielle mettait en mouvement était disposé de manière à recevoir latéralement une poulie, d'un diamètre variable, pour l'application de la courroie qui doit transmettre les mouvements. Le poids de la machine était de 3500 kilogr., y compris l'attelage et les 4 roues en fonte sur lesquelles la machine était montée.

Les pompes employées étaient à 2 corps, de $0^m,25$ de diamètre; la course du piston était de $0^m,145$, et pour chaque corps de pompe un coup de piston correspondait à deux tours de volant de la machine.

Les vis d'Archimède avaient $0^m,54$ de diamètre extérieur, et 6 mètres de longueur; elles faisaient également une révolution pour deux tours du volant.

PONT DE :	DATE du travail.	DURÉE du travail.	MACHINES à épuiser.	EAU élevée.	HAUTEUR d'élévation réelle.	HAUTEUR d'élévation utile.	TOURS du volant par 1'.	COKE brûlé.	DÉPENSE totale.
		heures		m. c.	m.	m.		kil.	fr.
L'Hermitage.	Du 15 au 25 août. . .	192	3 pomp.	20000	3,00	2,40	100	1920	384
La Chaussée.	Du 12 au 30 sept . . .	288	3 pomp.	27000	3,00	2,40	109	2900	500
Saint-Benoît	Du 29 oct. au 15 déc.	600	2 vis.	110000	2,20	1,80	88	5800	629
Totaux.		1080		157000				10620	1513

Ainsi, du 15 août au 15 décembre la machine a travaillé 1080 heures; elle a consommé 10620 kil. de coke, ce qui fait environ 10 kil. par heure, et les dépenses totales pour le coke, le service et la conduite de la machine ont été par heure 2^f, $1^f,735$ et $1^f,05$, ce qui fait en moyenne $1^f,40$. Les différences de ces dépenses paraissent tenir à ce que, dans les premiers temps, le mécanicien ne connaissait pas encore suffisamment sa machine, à ce que les frais généraux ont pu ne pas être exactement distribués, enfin à ce que les épuisements du troisième chantier ont duré plus longtemps et marché beaucoup plus régulièrement.

Tableau des résultats que l'on peut espérer des divers modes d'épuisement, d'après M. Morandière.

MODES D'ÉPUISEMENT.	DURÉE du travail journalier d'un ouvrier.	EAU ÉLEVÉE A 1m par heure et par		PRIX de la journée d'un ouvrier.	PRIX de l'heure de travail par vis ou par pompe.	DÉPENSE pour 1 mètre d'eau élevée à 1 mètre de haut. utile.	LIMITES des hauteurs ordinaires des épuisements.
		ouvrier.	vis ou par pompe.				
1° *Vis d'Archimède.*	heures.	m. c.	m. c.	fr.	fr.	fr.	mèt.
Mues à bras.	6	12,75	102,00	2,70	3,60	0,035	2 à 4
Mues par des chevaux.	»	»	85,60	»	0,75	0,009	*id.*
Mues par la vapeur. .	»	»	165,00	»	0,70	0,0043	*id.*
2° *Pompes.*							
Mues à bras.	6	9,00	54,00	2,70	2,70	0,050	1 à 8
Mues par des chevaux.	»	»	66,00	»	0,75	0,011	*id.*
Mues par la vapeur . .	»	»	79,00	»	0,47	0,006	*id.*
3° *Baquetage.*							
Ecopes ordinaires. . . .	8	6	»	2,00	0,25	0,042	0 à 1,2
Ecopes hollandaises . .	8	15	»	2,00	0,25	0,017	*id.*
Seaux à mains.	8	4	»	2,00	0,25	0,063	0 à 1,8
Seaux avec treuil et manivelle.	6	15	»	2,70	0,45	0,030	4 à 20

Ce tableau montre que pour les épuisements qui doivent avoir une certaine durée l'emploi d'une machine à vapeur procure une économie d'environ moitié sur l'emploi des manèges à chevaux, et une économie de près de 0,9 sur le simple travail à bras. De plus encore, par suite de l'insuffisance du travail, la petite machine qui a fourni les résultats de ce tableau ne marchant qu'à 2,5 atmosphères au lieu de 5 atm. environ, on conçoit qu'il devait encore y avoir perte de force, la machine fonctionnant sans condensation.

Les avantages présentés par l'emploi d'une petite machine à vapeur locomobile sont : de procurer d'abord une grande économie, puis de débarrasser les chantiers des nombreux ateliers d'épuiseurs, qui y apportent souvent le trouble, de mettre une force considérable à la disposition des travaux, de diminuer le nombre des machines à épuiser, et de permettre de les resserrer dans un très petit espace.

Au pont de Croix-Daurade, près de Toulouse (*Art.* 214), pour implanter les culées sur le roc, on a exécuté un déblai ayant près de $3^m,50$ d'épaisseur en contre-bas de l'étiage, dans un sol formé de sable argileux et de tuf mollasse que la drague ne pouvait attaquer. Les fouilles ont été faites dans l'enceinte d'un batardeau qu'on tenait asséché au moyen de deux pompes Letestu de $0^m,40$ de diamètre, élevant moyennement chacune 530 mètres cubes d'eau par 24 heures. Chaque pompe était

manœuvrée par 12 hommes relayés toutes les heures par 12 autres, de sorte que pour les deux pompes il y avait constamment 48 hommes sur le chantier, non compris 2 hommes pour soigner les pompes.

A la reconstruction du pont Louis-Philippe, à Paris, on a fait usage d'un système de pompes d'épuisement de MM. Farcot. Cette pompe, qui est à double effet et a donné les meilleurs résultats, est essentiellement composée de deux pistons, qui montent et descendent en même temps. Chaque piston a $0^m,45$ de diamètre et $0^m,15$ de course. Le volume engendré par tour est de 48 litres, soit 3360 litres pour les 70 tours par minute. Le mouvement est donné par une locomobile, à l'aide d'une courroie.

ASCENSEURS. GRUES. VÉRINS

341. Ascenseurs hydrauliques. Une des applications les plus modernes de la puissance hydraulique est celle relative au fonctionnement des ascenseurs et des monte-charges. Aujourd'hui la plupart des édifices publics et des hôtels sont pourvus d'ascenseurs. Dans les grandes villes, où l'on dispose de conduites d'eau en pression, il est économique d'en faire usage pour actionner les ascenseurs. Dans le cas où l'on ne possède pas de conduite, il est indispensable d'actionner l'ascenseur au moyen dun réservoir supérieur alimenté par des pompes.

Indépendamment du mode d'alimentation, les ascenseurs présentent des dispositions assez distinctes, dont nous allons indiquer les principales.

Le système le plus ancien est celui que M. Edoux fit fonctionner à l'Exposition de 1867 et qu'il a perfectionné dans l'installation de l'ascenseur du Trocadéro, en 1878.

Le système de M. Edoux consiste essentiellement en un tube placé sous le sol et ayant une longueur égale à la course que le plateau doit parcourir. Dans ce tube se meut un piston plongeur d'une longueur égale. Le plateau, portant la cabine à voyageurs est fixé sur la tête du piston plongeur. Le poids de la cabine est d'ailleurs équilibré par des contrepoids.

L'ascenseur est mis en mouvement au moyen d'un distributeur analogue au tiroir d'une machine à vapeur. Pour faire monter la cabine, il suffit de mettre l'eau en pression en communication avec le dessous du piston au moyen du distributeur.

Pour la descente, on établit la communication de l'eau contenue dans le cylindre avec un tuyau de décharge. Des dispositions particulières permettent l'arrêt à volonté de l'ascension ou de la descente; ce qui permet dans les immeubles de desservir les divers étages. A la tour Eiffel, le système Edoux a été appliqué entre le deuxième étage et la plate-forme supérieure sur une hauteur de $160^m,40$. La disposition comprend deux cabines se faisant équilibre et parcourant chacune

80m,20. Des dispositions mécaniques sont prises pour éviter les accidents qui résulteraient d'une descente brusque de la cabine par suite d'une avarie arrivée dans les organes du mécanisme.

Ascenseur à câble de Samain. Dans cet ascenseur, la cabine n'est pas portée par le piston. Elle est suspendue par un système de chaîne qui s'enroule sur une grande poulie, placée à la partie supérieure du bâtiment. A l'autre extrémité de la chaîne enroulée est attaché un contrepoids qui, formant piston, se meut dans un corps de pompe.

Tout l'appareil est placé au-dessus du sol et n'exige aucun tubage souterrain. Dans cet ascenseur, les mouvements se produisent à l'inverse de ceux de l'ascenseur à piston. Quand on introduit l'eau sous le piston, celui-ci monte, mais en même temps la cabine descend. Au contraire, la cabine monte pendant que le piston descend et que l'eau introduite s'écoule dans la conduite de décharge.

L'appareil est muni de freins de sûreté.

Ascenseur Otis, de la compagnie américaine. La cabine est suspendue comme dans l'ascenseur *Samain*, à l'aide d'un câble s'enroulant sur une poulie supérieure, l'autre extrémité de ce câble s'enroule sur une moufle qui porte un contrepoids faisant piston et se mouvant dans un corps de pompe. Mais la disposition caractéristique consiste en ce que la course du piston n'est que moitié de celle de la cabine.

Toute l'installation est extérieure et se fait à partir du niveau des caves.

Le système Otis est appliqué à la tour Eiffel, au Champ de Mars, allant du sol au second étage, sur une hauteur de 113 mètres. D'après la disposition des moufles, un déplacement d'un mètre du piston dans le cylindre hydraulique correspond à une élévation de 12 mètres de la cabine.

Ascenseur à piston horizontal. Pour éviter le tubage, on a pensé à faire l'installation du tube hydraulique entièrement horizontale. Sur le sol de la cave ou dans un espace souterrain on a posé des solives portant le cylindre métallique dans lequel se meut le piston plongeur. La tête du piston est armée de deux poulies qui suivent son mouvement de va-et-vient. Une chaîne de galle est fixée par un bout au cylindre et, après s'être enroulée autour des poulies, elle est renvoyée verticalement en haut de la construction, pour supporter à son autre bout la cage de l'ascenseur.

342. **Monte-charges de fabrique.** Les monte-charges de fabrique se composent d'une cage équilibrée par un contrepoids; la charge est élevée au moyen d'un treuil mû à bras d'homme ou par une transmission par courroies.

L'appareil doit être muni d'un frein. Ce système tend à être remplacé par les monte-charges et ascenseurs hydrauliques (341).

Pour les monte-charges manœuvrés par une transmission, la vitesse v à la *montée* doit être prise de 0m,3 à 0m,5, et à la *descente*, de 0m,5 à 0m,7.

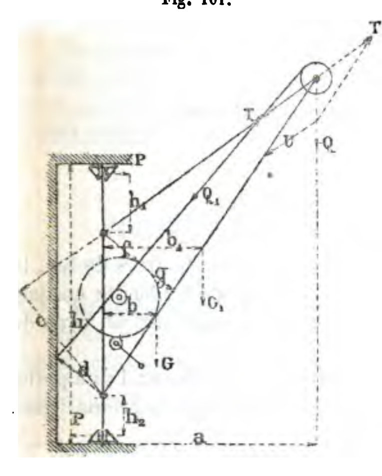
La somme des résistances au mouvement est environ le quart de la

charge Q. On a alors à fournir sur la courroie, en chevaux-vapeur :

$$N = \frac{1,25\,Qv}{75} = 0,0167\,Qv.$$

343. Grues. Les grues pivotantes, si employées pour élever de lourds fardeaux et spécialement pour décharger les bateaux, peuvent être classées en trois catégories : les grues d'applique, c'est-à-dire celles qui sont fixées contre un mur, les grues indépendantes, et les grues transportables ou grues locomobiles.

Fig. 101.



Grues d'applique (*fig.* 101, d'après Cl. de Laharpe). Dans ce système, la traction T du *tirant* ou lien supérieur est donnée par la formule :

$$T = \frac{Qa + G_1 b_1 - Q_1 d}{c}.$$

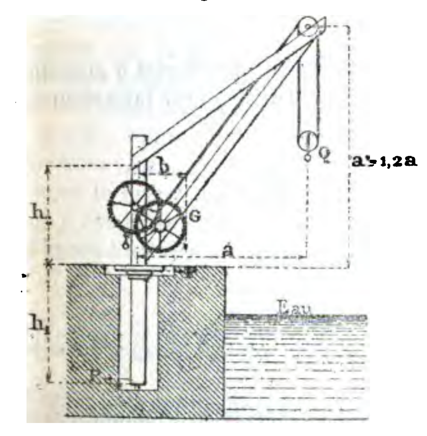
Q charge à soulever.
G poids de la grue.
} Ces deux quantités sont considérées comme égales;

h hauteur totale du montant : $h = a$;
$b = 1/4\,h$ distance du centre de gravité du bâti de la grue, à l'axe des tourillons;
G_1 poids de la volée;
c, d, etc. bras de leviers mesurés directement sur une épreuve.

La volée ou lien inférieur se calcule comme une pièce chargée debout, pour la compression :

$$U = \frac{Qa + G_1 b_1 + Q_1 f}{g}.$$

Fig. 102.



L'effort horizontal agissant par les pivots sur les crapaudines ou colliers du haut en bas se représente par :

$$P = \frac{Qa + Gb}{h}.$$

Le pivot inférieur supporte la compression Q + G.

Grues indépendantes (*fig.* 102). L'effort horizontal P s'exerçant sur le pivot (flexion) et sur la couronne de galets est :

$$P = \frac{Qa + Gb}{h_1}.$$

$h_1 = 0,6$ à $0,8\ a$;
$h_2 = 0,4\ a$;
G poids de la partie tournante $= \frac{3}{4}$ Q;
Q charge à soulever.

Le diamètre du pivot $d = 0,09\sqrt{P}$. Ce pivot supporte, en bout, la compression G + Q.

Le moment M de la résistance est :

$$M = P\left(0,05\,\frac{d'}{d} + 0,1\,d''\right) + \frac{d''}{3}\,(Q + G).$$

d diamètre des galets de friction;
d' diamètre du cercle passant par les centres des galets;
d'' diamètre du pivot.

Grues locomobiles. Pour les grues locomobiles des chemins de fer, la volée est de 4 mètres, l'écartement des essieux est de $1^m,50$; le contre-poids est les 92/100 de la charge à soulever et doit agir sur un bras de levier inférieur à 3 mètres.

344. Crics et vérins. Le cric ordinaire, destiné à soulever d'une petite quantité des corps très pesants, se compose d'une tige à crémaillère, conduite par un simple ou double engrenage.

Le rendement peut atteindre 45 p. 100.

L'effort moteur P nécessaire agissant sur la manivelle est :

$$P = \frac{1}{0,40}\,Q\,\frac{r_1}{L}\cdot\frac{r}{R}, \quad \text{d'où} \quad \frac{Q}{P} = 0,40\,\frac{LR}{r r_1}.$$

L rayon de la manivelle (de $0^m,30$ à $0^m,35$);
Q résistance à vaincre;
R et r rayons de la première paire d'engrenages;
r_1 rayon du pignon qui commande la crémaillère.

Le *cric à vis*, appelé aussi *vérin*, se monte sur un chariot à glissières commandé par une vis à simple filet qui peut le déplacer latéralement.

L'effort moteur P est, dans ce cas :

$$P = \frac{1}{0,45}\,Q\,\frac{s}{2\pi L} = 0,33\,Q\,\frac{s}{L},$$

d'où :

$$\frac{Q}{P} = 3\,\frac{L}{s} \text{ (en nombre rond).}$$

L longueur du levier à rochet;
s pas de la vis;
Q charge à soulever.

Enfin, il existe des crics hydrauliques ou vérins hydrauliques, dont le rendement peut atteindre 65 p. 100 et qui fonctionnent comme une presse hydraulique (328). Une manette dirige le petit piston; la tête du cric forme réservoir, et l'eau se refoule dans le corps de pompe inférieur

Le grand piston est solidaire avec la patte du cric. En desserrant une vis, on fait remonter l'eau dans le réservoir et le vérin descend.

Les vérins hydrauliques se construisent en acier; certains peuvent atteindre une puissance de 200 tonnes. Un vérin d'une charge d'épreuve de 3000 kilogrammes, pèse 16 kilogrammes; un vérin d'une charge d'épreuve de 60 000 kilog., pèse 165 kilog.

Rappelons les vérins en acier forgé employés à la tour Eiffel pour régler la verticalité de la tour et la répartition des pressions du poids de la tour (10 millions de kilog.). Ces vérins, au nombre de seize, étaient logés dans les pieds de la tour. Ils présentaient un diamètre de $0^m,430$ et pouvaient porter chacun 800 000 kilog. Ils ont été essayés à la pression de 600 atmosphères.

MOULINS A VENT. MOULINS A BLÉ, A HUILE, ETC.

345. Moulins à vent. La pression exercée par le vent contre un surface plane normale à la direction de son mouvement est, pour des vitesses inférieures à 10 mètres par seconde :

$$P = 0,11\, ds^{1,1}v^2, \qquad (a)$$

ou à peu près

$$P = ds \times 2h.$$

P pression en kilogrammes;
d poids d'un mètre cube de l'air en mouvement;
s surface de la place en mètres carrés;
v vitesse du vent en mètres par seconde, ou vitesse relative de choc de l'air contre le disque si l'un et l'autre sont en mouvement (*Int.* 1510);
$h = \frac{v^2}{2g}$ hauteur génératrice de la vitesse v (19).

La première valeur de P fait voir que la pression croît dans un rapport plus grand que la surface choquée. D'après Borda, trois plaques, dont les surfaces étaient entre elles comme les nombres 1, 2,25 et 5,06 ont donné des expressions qui étaient entre elles comme les nombres 1, 2,44, et 5,97; valeurs qui croissent peu à peu comme les puissances 1,1 des surfaces (*Int.* 520 et 521).

Lorsque le vent frappe une surface suivant un certain angle, la pression qu'il exerce sur cette surface, dans la direction de son mouvement, est, d'après Hutton :

$$0,11\, ds^{1,1}v^2 (\sin i)^{1,84 \cos i}. \qquad (b)$$

i angle que fait la direction du vent avec la surface.
Les autres lettres ont les mêmes significations que dans le cas précédent.

Si l'angle i est droit, on a $\cos i = 0$, $\sin i = 1$, d'où $(\sin i)^{1,84 \cos i} = 1$, et la formule ($b$) n'est plus autre chose que la formule (a); ce qui devait être.

Tableau des pressions exercées par le vent à différentes vitesses contre une surface d'un mètre carré, choquée directement, d'après la formule (a).

DÉSIGNATION DES VENTS.		VITESSE par seconde.	PRESSION par mètre carré.
		mèt.	kilogr.
Vent à peine sensible		1,00	0,14
Brise légère		2,00	0,54
Vent frais ou brise		4,00	2,17
Vent bon frais	tend bien les voiles	6,00	4,87
	le plus convenable aux moulins	7,00	6,64
	forte brise	8,00	8,67
	convenable pour la marche en mer	9,00	10,97
Vent grand frais	très forte brise	10,00	13,54
	fait serrer les hautes voiles	12,00	19,50
Vent très fort		15,00	30,47
Vent impétueux		20,00	54,16
Tempête		24,00	78,00
Tempête violente		30,05	122,28
Ouragan		36,15	176,96
Grand ouragan		45,30	277,87

Les résultats de ce tableau supposent la pression barométrique égale à $0^m,755$ de mercure, et la température égale à 12°; ce qui donne $d = 1^k,231$. Quand $s = 1$, on a aussi $s^{1,1} = 1$.

Un vent dont la vitesse est inférieure à 4 mètres par seconde n'est pas suffisant pour qu'un moulin à vent puisse moudre le blé, et si la vitesse dépasse 8 mètres, on est obligé de commencer à serrer les voiles.

D'après Smeaton, un moulin à vent donne le maximum d'effet quand ses ailes sont des surfaces gauches dont les génératrices, situées aux points obtenus en divisant la longueur de l'aile en 6 parties égales, font avec l'axe de la roue ou la direction du vent les angles désignés dans le tableau suivant. (La génératrice n° 1 est celle qui se trouve au point de division le plus rapproché de l'axe; c'est en ce point que commence la voilure.)

NUMÉROS des génératrices.	ANGLES avec l'axe.	ANGLES avec le plan du mouvement des ailes.	OBSERVATION.
1	72°00	18°00	Les angles de la seconde et de la troisième colonnes sont complémentaires.
2	71 00	19 00	
3 milieu de l'aile.	72 00	18 00	
4	74 00	16 00	
5	77 50	12 50	
6	83 00	7 00	

Une différence de quelques degrés avec les valeurs du tableau est sans influence sur l'effet produit.

La largeur de l'aile est ordinairement comprise entre le 1/5 et le 1/6 de la longueur, et elle n'en doit jamais dépasser le 1/4.

L'aile, au lieu d'être rectangulaire, a quelquefois la forme d'un trapèze, dont le côté parallèle situé à l'extrémité de l'aile est égal au 1/3 de la longueur de l'aile et à 1,66 fois le côté parallèle intérieur; le côté parallèle extérieur est divisé par l'axe de l'aile en deux parties qui sont dans le rapport de 5 à 3. L'un des grands côtés du trapèze est parallèle au bras de l'aile. Il convient, du reste, de disposer les divers éléments de l'aire trapézoïdale en surface gauche, comme pour l'aile rectangulaire.

D'après Smeaton, les ailes d'un moulin à vent étant bien airées, lorsqu'elles marchent sans charge, la vitesse de leur extrémité est égale à 4 fois celle du vent, et cette vitesse doit être égale à 2,5 ou 2,7 fois celle du vent pour que le moulin rende le maximum d'effet.

Smeaton conclut aussi de ses expériences que les charges sont à peu près proportionnelles aux carrés des vitesses du vent; ainsi les vitesses étant dans le rapport de 1 à 2, les charges ont crû dans celui de 1 à 3,75.

De là il résulte que les effets produits sont à peu près dans le rapport des cubes des vitesses du vent; c'est aussi ce que confirment les expériences de Smeaton, dans lesquelles les vitesses étant dans le rapport de 1 à 2, les effets ont été dans celui de 1 à 7,02.

L'effet dynamique en kilogrammètres par seconde d'un moulin à vent est assez bien représenté par l'expression :

$$nSV^3.$$

n coefficient égal à 0,05 d'après des expériences rapportées par Smeaton, où l'on avait $S = 0^{mq},2607$; des expériences faites par Coulomb, sur un grand moulin à vent construit aux environs de Lille, ont donné $n = 0,03$. Dans les cas ordinaires de la pratique, il conviendra d'adopter cette dernière valeur de n, en ne considérant toutefois les résultats fournis par la formule que comme des approximations;

S surface des quatre ailes en mètres carrés;

V vitesse du vent en mètres par seconde.

L'expression de l'effet utile rendu par un moulin à vent est la même que pour celui rendu par une roue pendante (304); la différence ne consiste que dans la valeur du coefficient numérique.

Dimensions des parties principales d'un moulin à vent.

Équarrissage de l'arbre	$0^m,50$ à $0^m,60$
Inclinaison de l'arbre à l'horizon	10° à 15°
Longueur des ailes, mesurée depuis l'axe de rotation	10 à 12 mètres.
Équarrissage des axes des ailes près de l'arbre	$0^m,30$
Espacement des petits barreaux implantés dans l'axe de l'aile et sur lesquels on étend les voiles	$0^m,40$
Surface ordinaire de chaque aile	20 mètres carrés.

Dans plusieurs localités, on rencontre des moulins à vent de 2, 3 et même 4 paires de meules pour moudre le blé, avec tous les appareils de nettoyage et de blutage.

M. Herpin a fait établir, dans le département de l'Indre, un moulin à

vent commandant 3 paires de meules de différents diamètres, et disposé pour faire fonctionner une scie circulaire et une huilerie, et à côté, sous un hangar, une machine à battre.

M. Herpin a fait remplacer la voilure ordinaire, qui était difficile à manœuvrer, par la voilure en planches mobiles du système Berton.

Hauteur du centre de rotation des ailes au-dessus du sol	14^m,80
Diamètre au bas de la tour, qui est octogonale et formée par 8 poteaux en bois de 12 mètres de hauteur reposant sur des dés en pierre de 1 mètre de hauteur.	8 ,00
Diamètre de la tour au sommet des poteaux.	5 ,50
Distance du centre de rotation à l'extrémité des ailes.	10 ,00
Longueur des planches formant voilure	8 ,00

Chaque voilure est composée de 11 planches en sapin de 0^m,01 d'épaisseur, 0^m,25 de largeur et 8 mètres de longueur, qui peuvent se rapprocher plus ou moins, à la manière des deux branches de la règle parallèle du dessinateur, de manière à former un parallélogramme plus ou moins large. Les ailes sont planes et ont une largeur qui peut varier de 2 mètres à 2^m,50. Le plan des ailes fait un angle d'environ 18° avec le plan du mouvement. Les meules et accessoires marchent le plus convenablement quand la volée, ayant toute sa voilure, fait 11 à 12 tours par minute, ce qui correspond à une vitesse d'environ 5 à 6 mètres par seconde pour le vent.

La construction de ce moulin est revenue à 19 600 francs.

M. Herpin estime que l'on peut moudre et bluter au moins 2 500 hectolitres de blé par année; mais, exploité pour son compte par des gens qui prennent plus ou moins ses intérêts, le produit n'a guère dépassé 2 000 hectolitres.

100 kilogrammes de blé froment de deuxième qualité, pesant 72 kilogrammes l'hectolitre, ont donné, dans une expérience faite par M. Herpin :

Farine plus ou moins blanche.	72^k,60
Farine bise	6 ,80
Recoupes.	4 ,20
Sons	15 ,70
Déchet	0 ,70
Total.	100^k,00

346. **Moulin à vent appliqué à une huilerie ou à la mouture du blé.** Les expériences de Coulomb (page 383) ont été faites sur un moulin à vent faisant marcher les pilons d'une huilerie. Les cames sont montées sur l'arbre du moulin; elles communiquent directement le mouvement à 5 pilons pesant chacun 510 kilogrammes destinés à broyer la graine de colza, et à deux autres pesant chacun 250 kilogrammes destinés à serrer et desserrer les coins qui séparent, par compression, l'huile de la gangue. Il n'y a jamais qu'un de ces derniers pilons qui marche à la fois; mais les cinq autres fonctionnent simultanément quand le vent le per-

met. L'élévation verticale des pilons est de 0m,49, et chacun de ceux mis en mouvement s'élève deux fois par tour du moulin.

Tableau des résultats fournis par trois expériences de Coulomb.

VITESSE DU VENT par seconde.	NOMBRE DE TOURS par 1'.	POIDS ÉLEVÉ A 0m,49 par tour.	EFFET UTILE par 1'.
mèt.		kil.	km.
2,27	3	1020	1 499
4,06	7,5	2540	9 334
6,50	13	5600	35 672

A la vitesse de 6m,50, on marche avec toutes les voiles sans que la machine se fatigue; mais, passé cette limite, on commence à carguer les voiles.

L'effet utile en chevaux-vapeur transmis par l'arbre du moulin dans la troisième expérience est, en négligeant les frottements et les chocs des pilons (96), $\frac{35672}{4500} = 7,9$ chevaux. La surface utile de chaque aile ayant 10 mètres de longueur sur 1m,95 de largeur, ce qui fait 78 mètres carrés pour 4 ailes, la surface de voilure est donc de 10 mètres carrés environ par force de cheval. Dans la deuxième expérience, cette surface était de 40 mètres carrés environ.

Un relevé du travail de plusieurs années a fait voir que chaque moulin fabrique moyennement 40000 kilog. d'huile par an. Le travail transmis aux pilons par 100 kilog. d'huile fabriqués étant de 14000 à 15000 grandes unités dynamiques (34), en admettant avec Coulomb que les frottements et les chocs des pilons absorbent le 1/6 environ du travail transmis à ces pilons, il en résulte que la fabrication seule de 100 kilog. d'huile exige moyennement 12000 grandes unités dynamiques. Morin rapporte que les meules d'un moulin à huile pesant 3000 kilog., l'arbre vertical faisait 6 tours par minute, le poids de graine chargé à chaque rechange de 10' était de 25 kilog., le poids de la graine broyée en un jour était de 1 500 kilog., et la quantité d'huile fabriquée en 12 heures, 600 kilog. Le travail transmis par l'arbre moteur étant de 205 kilogrammètres par seconde, il en résulte que, par ce procédé, la fabrication de 100 kilog. d'huile n'absorbe que 1 476 grandes unités dynamiques, c'est-à-dire le 1/10 environ de celui absorbé par l'emploi des pilons.

D'après Coulomb, on peut admettre que le travail annuel d'un moulin à vent n'est que le tiers environ de celui qu'il produirait en marchant d'une manière continue dans les conditions les plus favorables, c'est-à-dire sous l'action d'un vent de 6m,50 à 7 mètres de vitesse par seconde.

Coulomb ayant soumis à l'expérience un moulin à blé, dont la meule faisait 5 tours pour une révolution des ailes, a reconnu que le mouvement ne commençait à avoir lieu que quand la vitesse du vent attei-

gnait 4 mètres, et que cette vitesse ayant atteint 5m,80, les ailes faisaient de 11 à 12 tours par minute, et la quantité de blé moulu sans être bluté était de 400 à 450 kilogr. à l'heure.

347. Moulins à blé mus par roues hydrauliques. Hachette rapporte que dans un moulin de Corbeil, mû par une roue à aubes transmettant 1 321 grandes unités dynamiques par heure, la meule ayant 2 mètres de diamètre et faisant 67 révolutions par minute, la quantité de farine brute (son et farine mélangés) produite a été de 200 kilogr. en 1 heure 15 minutes. Ce résultat prouve que Coulomb a dû se tromper dans l'évaluation du blé moulu par un moulin à vent. Des résultats de Hachette il résulte que la mouture à la grosse de 100 kilog. de blé absorbe 825 grandes unités dynamiques.

D'Aubuisson conclut, des résultats obtenus par différents observateurs, que la force que doit transmettre l'arbre d'une roue hydraulique commandant un moulin est au moins de 3 chevaux par hectolitre de blé de 75 kilogr. à moudre par heure; c'est 1 080 grandes unités dynamiques pour 100 kilogr. de blé.

Les meules le plus généralement adoptées aujourd'hui en France, dans les moulins à l'anglaise, ont 1m,30 de diamètre et 0m,27 d'épaisseur; elles sont percées à leur centre d'un trou de 0m,27 à 0m,33 de diamètre, appelé *œillard.* La profondeur des rayons n'est pas de plus de 5 à 6 millimètres; ils sont formés en plan incliné, afin de présenter d'un côté une arête tranchante qui coupe les grains de blé, pour en faciliter le broiement complet. On a généralement reconnu qu'une vitesse de 110 à 120 révolutions par minute était convenable pour des meules de 1m,30; au-dessus, on a à craindre l'échauffement de la farine.

Dans les usines bien organisées des environs de Paris, rapportent MM. Cartier et Armengaud, les meules de 1m,30 de diamètre, faisant 115 à 120 révolutions par minute, ne moulent en moyenne que 15 à 16 hectolitres de blé en 24 heures, en produisant, il est vrai, de 60 à 63 p. 100 de cette farine première si recherchée par la boulangerie parisienne. La force nécessaire par paire de meules dans ces conditions, y compris nettoyage et blutage, est de 2 chevaux et demi (le produit est moyennement de 20 à 22 kilog. par force de cheval et par heure). Ainsi, pour une puissance effective de 15 chevaux, on établira 6 paires de meules, y compris celle qui peut être en rhabillage, et cette opération s'effectuant à peu près régulièrement tous les 5, 6 ou 7 jours au plus, sur les 6 paires, il y en aura donc presque constamment une d'arrêtée. Le meunier s'arrange du reste pour que cette opération soit bien et promptement exécutée, et autant que possible pendant le jour.

Dans un grand nombre de localités, comme Lyon et Dijon, on rapproche moins les meules qu'à Paris; elles produisent plus de rondes ou de secondes que de premières; on leur fait alors moudre 24 à 25 hectolitres de blé en 24 heures, et même plus, et chaque paire de meules absorbe la force de 3 chevaux (le produit est de 25 à 26 kilog. par force de cheval et par heure).

Pour les manutentions militaires, les meules travaillant encore moins

rapprochées, et le nettoyage et le blutage étant moins parfaits, chaque paire moud de 30 à 32 hectolitres en 24 heures et exige une puissance effective de 3 chevaux et demi (le produit correspond à 28 ou 30 kilog. par force de cheval et par heure).

Dans les moulins des États-Unis d'Amérique, les meules ont généralement $1^m,50$ de diamètre, font 100 tours par minute, et, d'après les observations d'Évans, la quantité de blé moulue est de 1,76 hectolitre par heure, et la force du moteur de 3 chevaux par hectolitre.

Dans un moulin à l'anglaise des environs de Paris, le relevé d'une mouture de 3520 setiers de blé, pesant ensemble 417452 kilog., a donné les résultats proportionnels suivants :

Farines, 1re et 2e qualités	0,720
Id. 3e et 4e	0,023
Criblures	0,007
Issues diverses	0,215
Déchets, évaporations, balayures	0,035
Total	1,000

348. On distingue quatre espèces de moutures :

1° *Mouture économique ou française.* C'est celle encore employée dans les petites usines de nos campagnes. Les meules ont 2 mètres de diamètre, et font de 55 à 60 tours par minute. Le blé est introduit dans l'ouverture de la meule supérieure au moyen d'une trémie constamment agitée. En sortant des meules, que l'on tient assez espacées pour que le grain soit seulement concassé, la mouture est séparée par le bluteau : 1° en *farine* dite de blé, qui traverse le tissu ; 2° en *gruaux*, qui traversent plus loin, et 3° en *son* volumineux et léger. Ces premiers gruaux sont de nouveau soumis à l'action des meules, que l'on tient alors plus rapprochées, et ils fournissent une farine de 1er gruau et des 2es gruaux, qui donnent à leur tour une farine de 2e gruau et des 3es gruaux. Enfin, ceux-ci produisent des farines bises de 3e gruau, et un 4e gruau, qui produit une farine de 4e gruau, et des issues, appelées *remoulages* ou *recoupes*, qui contiennent les parties dures et grisâtres avoisinant l'enveloppe des grains. Pour ces opérations, 100 kilog. de blé donnent en moyenne les résultats suivants :

Farines blanches.	1re opération :	Farine dite de blé	38k,33	66k,00
	2e *Id.*	Farine dite de 1er gruau	19 ,16	
	3e *Id.*	Farine dite de 2e gruau	8 ,51	
Farines bises	4e *Id.*	Farine dite de 3e gruau	5 ,00	8 ,33
	5e *Id.*	Farine dite de 4e gruau	3 ,33	
Issues	Son gros et petit		10 ,82	23 ,32
	Recoupes		6 ,80	
	Recoupettes		5 ,70	
	Déchet, évaporation, perte			2 ,35
	Total			100k,00

Les blés durs, demi-durs et tendres se traitent également bien par cette méthode.

2° *Mouture plate ou basse, dite anglaise.* Elle consiste à écraser complètement le blé dans un seul passage entre les meules, qui doivent être très rapprochées, afin de produire le moins possible de gruau. Le son et les différentes qualités de farines sont séparés au moyen de bluteries convenables. Les meules ont de 1m,20 à 2 mètres de diamètre, et elles font 120 tours à la minute. Leur épaisseur est d'environ 0m,30.

Les blés qui conviennent le mieux à ce genre de mouture sont les durs et demi-durs.

Pour 100 kilogrammes de blé, on obtient en moyenne :

Farine à pain blanc	60
Id. demi-blanc	14
Son gros et menu	24
Déchet	2
Total	100

3° *Mouture à gruaux.* Elle produit les belles farines employées à faire les pains de luxe dans les grandes villes; on ne l'applique avec avantage qu'à des froments demi-durs et durs, à grains réguliers et volumineux.

Après avoir soumis le blé à un nettoyage énergique, on le fait passer entre des meules convenablement éloignées pour bien détacher l'écorce du gruau, en produisant le moins possible de folle-farine. La mouture est alors amenée dans un blutoir en étamine, qui sépare la farine dite *petit-blanc* ou à *vermicelle;* puis, le mélange de son et de gruaux est versé dans une bluterie d'étoffe à mailles de plus en plus larges, qui partage les gruaux en trois grosseurs; les moins gros dits *fins-finots*, fournissent la première qualité de farine. Quant aux moyens et aux gros, ils sont traités séparément et débarrassés du son et de la folle-farine qui peuvent encore y adhérer; ainsi purifiés, ces deux gruaux, qu'on nomme *semoule,* sont de nouveau soumis à la mouture; ce qui donne une farine qu'on réunit à la précédente pour former le n° 1, et de nouveaux gruaux. La farine obtenue des 3e et 4e gruaux forme le n° 2; celle qui provient de la 5e mouture est dite *blanche.* La 6e mouture fournit de la farine qu'on mêle avec la farine d'écorçage. La 7e mouture donne la farine bise.

Résultats moyens obtenus pour 100 kilog. de blé de bonne qualité :

Criblure ou petit blé	0k,800
Farine dite à vermicelle	20 ,352
Id. des gruaux n° 1	20 ,352
Id. *id.* n° 2	6 ,360
Id. blanche	11 ,448
Id. bise	19 ,040
Son	6 ,000
Recoupe	6 ,400
Remoulage	7 ,599
Perte	1 ,649
Total	100k,000

4° *Mouture hongroise*. La monture hongroise emploie des cylindres broyeurs, au lieu de meules. L'opération se fait successivement par plusieurs machines à cylindre, dont chacune a une fonction particulière. Le rendement est à peu près le même que pour la mouture par meules.

349. Moteurs à vent et turbines atmosphériques. Il a été dit (345 et 346) que l'inconvénient des moulins à vent est l'irrégularité du travail qu'ils fournissent.

En France jusqu'à ces dernières années, les moteurs aériens n'avaient subi aucun perfectionnement important, tandis qu'en Amérique ils ont été l'objet d'études et de diverses applications. Déjà, l'Exposition universelle de 1878 avait présenté dans la section américaine de bons modèles de moteurs aériens. Depuis cette époque, ces moteurs à ailettes articulées ont été construits en France avec quelques modifications, et se sont répandus dans l'industrie où ils sont utilisés à l'élévation des eaux pour irrigation et pour les besoins des fermes, et aussi pour scierie et battage des grains.

Aux États-Unis, on se sert de ces moteurs pour actionner les pompes élévatoires destinées à l'alimentation des réservoirs sur les lignes de chemin de fer.

Dans les nouveaux moteurs à vent, les constructeurs se sont appliqués à régler les appareils de manière à utiliser les différentes forces du vent au moyen de dispositions permettant : 1° d'effacer le moteur sous le vent lorsque celui-ci est trop violent; ce qui se fait en masquant les ailes du moulin de telle sorte qu'elles présentent seulement leur tranche à l'action du vent; 2° de diminuer la surface de la voilure, suivant l'intensité du vent; 3° de faire agir automatiquement un frein sur l'axe du moteur afin de maintenir constante la vitesse de l'appareil.

L'Exposition universelle de 1889 présentait un assez grand nombre de variétés de moteurs aériens. Ceux à panneaux mobiles paraissaient être les plus avantageux et ceux qui se dérangent le moins.

D'après l'ouvrage de M. Alfred R. Wolff, publié à New-York en 1885, le travail des moteurs à vent de $2^{m},60$ à 7 mètres de diamètre, avec un vent de $4^{m},88$ à la seconde, a été trouvé de 3 à 100 kilogrammètres. Il établit ainsi la dépense du cheval-vapeur, fourni par heure, des moteurs de $2^{m},60$ à $7^{m},60$ de diamètre : $0^{f},75$ à $0^{f},16$. Dans son calcul, les appareils marchaient le tiers du temps, c'est-à-dire 8 heures par 24 heures. L'intérêt du capital et de l'amortissement sont comptés au taux de 10 p. 100.

Citons, parmi les résultats d'expériences faites en France par M. Schabaver, ceux d'un moulin de $9^{m},15$ de diamètre de voilure, établi à Mazamet (Tarn), d'après lesquels on a élevé 400 litres d'eau à la minute à la hauteur de 35 mètres par des vents de 6 à 7 mètres de vitesse.

Il faut signaler aussi parmi les moteurs aériens ceux qu'on désigne sous le nom de *turbines atmosphériques*. Dans cette catégorie, il y a l'*Éolienne*, de M. A. Bollée fils, constructeur au Mans. Cet appareil s'oriente de lui-même à tous les vents et se désoriente pendant les tempêtes. Il est construit d'après le principe des turbines hydrauliques (305).

Des directrices fixes conduisent le vent sur les aubes de lá roue mobile. C'est un appareil qui donne de bons résultats, mais exigeant une construction soignée.

Mentionnons encore la turbine atmosphérique de M. A. Dumont, qui est d'un système tout particulier. D'après l'inventeur, pour utiliser toute la puissance du vent, il est nécessaire que le volume d'air, agissant par pression, s'écoule avec la même vitesse en tous les points de la surface de la voilure. D'après cela, il a adopté pour les ailes une surface gauche hélicoïdale. La forme des ailes doit être déterminée par la condition que la résistance de l'air doit combattre la force centrifuge en tous les points des ailes. L'inventeur a adopté de grandes surfaces en petit nombre qui ont l'avantage de se mouvoir dans un courant d'air faible. Cet appareil peut aussi utiliser les courants les plus faibles.

En 1888, une application a été faite de la turbine Dumont pour l'alimentation d'eau de la ville d'Orgelet (Jura). Deux turbines de 6 mètres de diamètre, actionnant des pompes, ont été installées à 42 mètres au-dessus d'un étang. Les pompes refoulent l'eau, puisée dans l'étang, et l'élèvent dans un réservoir de 1 000 mètres cubes, installé au sommet de la butte d'où part la conduite qui alimente la ville située à 2 kilomètres. Chaque turbine refoule à cette hauteur 60 litres d'eau par minute. La quantité d'eau distribuée journellement est de 35 à 40 mètres cubes.

ÉCOULEMENT DES GAZ

350. Écoulement des gaz. (Consulter, pour l'analogie, l'écoulement de l'eau, nos 131 et suivants.) L'expérience prouve que les volumes d'un même poids d'un même gaz, sous des pressions et à des températures différentes, sont entre eux dans le rapport inverse des pressions, et dans le rapport direct des volumes que prend l'unité de volume à 0° en passant aux températures du gaz. De là, il résulte que les poids d'un même volume et les densités d'un même gaz, sous des pressions et à des températures différentes, sont entre eux dans le rapport direct des pressions, et dans le rapport inverse des volumes de l'unité de volume à 0°, ramenés aux températures du gaz; ainsi le poids d'un mètre cube d'air à 0° et sous la pression $0^{m},76$ étant $1^{k},293$, à la température $t°$ et sous la pression absolue $P + 0,76$ de mercure, est :

$$1^{k},293\,\frac{P+0,76}{0,76}\times\frac{1}{1+0,003\,665\,t}=1^{k},702\,\frac{P+0,76}{1+0,003\,665\,t}.$$

P pression ou hauteur indiquée par le manomètre à mercure communiquant avec l'atmosphère;

0,003665 coefficient de dilatation de l'air (voir la 2e partie);

$1+0,003665\,t$ volume que prend l'unité de volume à 0°, en passant à la température $t°$.

L'air de l'atmosphère contient toujours de la vapeur d'eau, et d'autant

plus que sa température est plus élevée; comme cette vapeur diminue sa densité, dans les applications on peut prendre pour le poids d'un mètre cube d'air atmosphérique :

$$1^k,7\,\frac{P + 0,76}{1 + 0,004t}.$$

Si la pression P était donnée en eau, le poids du mètre cube d'air à la température $t°$ aurait pour expression :

$$1^k,293\,\frac{P + 10,333}{10,333} \times \frac{1}{1 + 0,003\,665\,t}, \quad \text{soit} \quad 0^k,125\,\frac{P + 10,333}{1 + 0,004t}.$$

Lorsqu'un gaz s'échappe d'un vase où il est comprimé, il s'écoule avec une vitesse :

$$v = \sqrt{2gh} = \sqrt{2gP\,\frac{\delta}{\delta'}}.$$

g accélération de la pesanteur $= 9^m,81$, à Paris;
v vitesse d'écoulement;
h hauteur génératrice de la vitesse v, du gaz qui s'écoule ;
P pression marquée par le manomètre communiquant avec l'atmosphère ;
$h = P\,\frac{\delta}{\delta'}$;
δ densité du liquide placé dans le manomètre; pour le mercure $\delta = 13\,596$, et pour l'eau $\delta = 1$;
δ' densité du gaz comprimé; 0,001 293 étant la densité de l'air à 0° et sous la pression atmosphérique, selon que P est exprimée en mercure ou en eau, et que la température de l'air qui s'écoule est $t°$, on a :

$$\delta' = 0,001\,293\,\frac{P + 0,76}{0,76} \times \frac{1}{1 + 0,004t} = 0,0017\,\frac{P + 0,76}{1 + 0,004t}$$

ou

$$\delta' = 0,001\,293\,\frac{P + 10,333}{10,333} \times \frac{1}{1 + 0,004t} = 0,000\,125\,\frac{P + 10,333}{1 + 0,004t}.$$

Variation de la vitesse avec la pression. Si la pression P devient mP, la densité du gaz devient $\delta'\,\frac{mP + 0,76}{P + 0,76}$, et la vitesse :

$$v' = \sqrt{2gmP\,\frac{\delta(P + 0,76)}{\delta'(mP + 0,76)}}.$$

On a alors :

$$\frac{v'}{v} = \sqrt{\frac{m(P + 0,76)}{mP + 0,76}} = \sqrt{\frac{P + 0,76}{P + \frac{0,76}{m}}}.$$

Supposant $P = 0^m,76$, par exemple, selon que $m = 1$ ou $m = \infty$, il vient :

$$\frac{v'}{v} = \sqrt{1} = 1 \quad \text{ou} \quad \frac{v'}{v} = \sqrt{2} = 1,414.$$

Ainsi la vitesse varie très peu avec la pression. Supposant toujours

$P = 0^m,76$, pour les valeurs successives de m, valeurs qui indiquent les pressions mP en atmosphères :

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	∞

on a respectivement pour $\frac{v'}{v}$:

1,000	1,155	1,227	1,265	1,291	1,310	1,322	1,334	1,342	1,349	1,370	1,381	1,414

Variation de la vitesse avec la température. δ' étant la densité du gaz à la température t, à la température t' elle devient $\delta' \frac{1 + 0{,}003\ 665\,t}{1 + 0{,}003\ 665\,t'}$, et, par suite, la vitesse est :

$$v' = \sqrt{2gP\frac{\delta\ (1 + 0{,}003\ 665\,t')}{\delta'\,(1 + 0{,}003\ 666\,t)}}.$$

Pour $t = 0$, on a alors :

$$v' = \sqrt{2gP\frac{\delta}{\delta'}(1 + 0{,}003\ 665\,t')} \quad \text{et} \quad \frac{v'}{v} = \sqrt{1 + 0{,}003\ 665\,t'}.$$

De cette dernière équation, pour les valeurs successives de t' :

0°	50°	100°	150°	200°	250°	300°	350°	400°

on tire respectivement pour $\frac{v'}{v}$:

1,000	1,088	1,169	1,245	1,316	1,384	1,449	1,511	1,570

La *dépense théorique*, c'est-à-dire le volume de gaz qui s'écoulerait par un orifice s'il n'y avait pas contraction de la veine, est :

$$Q' = Sv = S\sqrt{2gP\frac{\delta}{\delta'}}.$$

Q' dépense théorique;
S section de l'orifice d'écoulement.

La dépense effectivé est toujours moindre que la dépense théorique; ainsi l'on a :

$$Q = kQ' = kS\sqrt{2gP\frac{\delta}{\delta'}}. \qquad (1)$$

Q *dépense effective* en air comprimé à la pression $P + 0{,}76$ de mercure;
k coefficient de la dépense; sa valeur dépend de la forme de l'orifice d'écoulement. D'après les expériences de d'Aubuisson, sur des orifices en mince paroi de $0^m,01$ à $0^m,03$ de diamètre, $k = 0{,}63$ pour les plus petits orifices, $k = 0{,}673$ pour les plus grands, et $k = 0{,}65$ en moyenne pour les orifices compris entre ces limites. Pour les mêmes orifices garnis d'ajutages cylindriques de diamètres égaux aux leurs, et d'une longueur de $0^m,04$ pour ceux de 0^m01, et de $0^m,08$ pour ceux de $0^m,03$, k a été à peu près constant, et égal en moyenne à 0,926.

D'Aubuisson a voulu se rendre compte de l'influence de la longueur de l'ajutage sur la valeur de k, et en opérant sur des tubes de $0^m,015$ de diamètre il a obtenu les résultats suivants :

LONGUEUR de l'ajutage.	VALEUR DE k.	DÉPENSE EFFECTIVE par seconde.
m.		m. cub.
0,022	0,938	0,00728
0,045	0,924	0,00700
0,162	0,838	0,00628
0,325	0,738	0,00570

Pour des ajutages coniques, dont le diamètre à la sortie était moitié de celui de l'entrée, et compris dans les limites de $0^m,01$ à $0^m,03$, les longueurs de ces ajutages étant de $0^m,04$ pour ceux de $0^m,01$ de diamètre à la sortie, et de $0^m,08$ pour ceux de $0^m,03$, la valeur de k a été à peu près constante et égale en moyenne à 0,93.

Pour les ajutages courts, peu convergents et de $0^m,015$ de diamètre à la sortie, d'Aubuisson a obtenu pour k les valeurs du tableau suivant (150) :

ANGLE de convergence.	LONGUEUR de l'ajutage.	VALEUR MOYENNE de k.
	mèt.	
6°26′	0,045	0,938
18 54	*id.*	0,917
53 8	*id.*	0,798
11 24	0,025	0,947
28 4	0,010	0,880

Ce tableau fait voir que des ajutages courts et peu convergents sont favorables à la dépense, et que l'angle de convergence ne dépassant pas 10 à 12°, il convient de faire $k = 0,94$.

Pour les buses, on devrait faire $k = 0,94$, valeur qui convient à leur angle de convergence; mais, à cause de leur longueur et afin de n'être pas en défaut pour la dépense, on devra faire $k = 0,93$ dans le calcul de leur section.

Q étant la dépense effective en air comprimé, cette dépense ramenée à la pression atmosphérique est :

$$q = Q\,\frac{P + b}{b}.$$

q volume d'air écoulé, ramené à la pression atmosphérique b;
P pression indiquée par le manomètre à air libre.
Les pressions P et b sont exprimées en hauteurs de même liquide, eau ou mercure.

Perte de charge dans l'écoulement des gaz par un orifice en mince paroi ou par un orifice garni d'un court ajutage cylindrique.

Posons :

$$Q = Su = S\sqrt{2gp\frac{\delta}{\delta'}}.$$

u vitesse que devrait posséder le gaz en tous les points de la section S, pour obtenir la dépense effective Q;

p hauteur manométrique correspondant à la vitesse u.

Égalant cette valeur de Q à la précédente (1), on a :

$$S\sqrt{2gp\frac{\delta}{\delta'}} = kS\sqrt{2gP\frac{\delta}{\delta'}} \quad \text{ou} \quad p = k^2P;$$

d'où :

$$P - p = \frac{p}{k^2} - p = \left(\frac{1}{k^2} - 1\right)p = Ap, \qquad (2)$$

en représentant par A le coefficient entre parenthèses.

La différence $P - p$, qu'on désigne sous le nom de *perte de charge*, est, comme on le voit, fonction du coefficient k de la dépense et de la charge manométrique p correspondant à la vitesse moyenne u du gaz dans l'orifice. La perte de charge étant Ap, elle est proportionnelle à p et par suite au carré de la vitesse.

Selon que k est égal à 0,65 ou 0,93, on a :

$$P - p = \left(\frac{1}{(0,65)^2} - 1\right)p = 1,367p \quad \text{ou} \quad P - p = \left(\frac{1}{(0,93)^2} - 1\right)p = 0,156p.$$

La formule $P - p = Ap$ donne :

$$p = P\frac{1}{1+A} \quad \text{ou} \quad 2gp\frac{\delta}{\delta'} = 2gP\frac{\delta}{\delta'} \times \frac{1}{1+A},$$

soit :

$$u = \sqrt{2gP\frac{\delta}{\delta'}} \times \sqrt{\frac{1}{1+A}} = \sqrt{\frac{2gP\delta}{\delta'(1+A)}}.$$

u est une vitesse particulière, c'est celle moyenne d'accès de l'air à l'orifice, et elle deviendrait égale à la vitesse réelle v, si le coefficient k de la dépense était égal à l'unité, cas où $A = 0$.

CONDUITES D'AIR

351. Conduites d'air. (N°s 184 et suivants.) De même que l'eau, l'air exerce un frottement contre les parois des tuyaux dans lesquels il circule. Ce frottement diminue la force élastique du gaz depuis l'origine du tuyau jusqu'à son extrémité, et cette diminution, c'est-à-dire la perte de hauteur manométrique, est analogue à la perte de charge dans les conduites d'eau; ainsi, en négligeant le terme contenant la première

puissance de la vitesse de l'air dans le tuyau, ce que l'on peut faire d'après les expériences de Hutton pour des vitesses comprises entre 3 et 100 mètres, on peut poser :

$$P - p = \frac{\varphi' L}{D} u'^2,$$

formule que d'Aubuisson transforme en cette autre :

$$P - p = p \frac{\varphi L d^4}{D^5}. \qquad (1)$$

φ' coefficient;
u' vitesse moyenne de l'air dans le tuyau; c'est la vitesse au milieu de la longueur du tuyau, et elle n'est jamais supérieure à 50 mètres et rarement inférieure à 3 mètres;
P hauteur indiquée par le manomètre placé à l'origine de la conduite;
p hauteur indiquée par le manomètre placé à l'extrémité de la conduite;
φ coefficient qui est égal, d'après les expériences de d'Aubuisson sur des tuyaux en fer-blanc de 0m,0235 à 0m,10 de diamètre, à 0,0238 en moyenne; cette valeur suppose que la buse ou l'ajutage placé à l'extrémité de la conduite donne lieu à un coefficient de dépense égal à 0,93, comme cela a lieu généralement (350);
L longueur de la conduite;
d diamètre de la buse ou de l'ajutage par lequel l'air s'écoule;
D diamètre de la conduite.

De la formule précédente on tire :

$$P = p\left(1 + \frac{\varphi L d^4}{D^5}\right).$$

P pression que doit indiquer le manomètre placé à l'origine de la conduite pour que l'air s'échappe par la buse avec une vitesse due à la hauteur p exprimée en air comprimé, c'est-à-dire à la hauteur $p\frac{\delta}{\delta'}$ (350). Cette vitesse n'est pas inférieure à 80 mètres par seconde pour les hauts fourneaux marchant au charbon de bois, et à 150 mètres pour ceux marchant au coke.

D'Aubuisson a aussi donné l'expression de la dépense d'une conduite; elle est :

$$Q = 1870 \sqrt{\frac{1 + 0,004t}{b + p}} \sqrt{\frac{PD^5}{L + 42\frac{D^5}{d^4}}}.$$

Q volume d'air, à $t°$ et sous la pression $b + p$, écoulé par seconde;
b pression atmosphérique;
0,004 coefficient de dilatation du gaz (350).

Si la conduite est entièrement ouverte à l'extrémité, on a $d = D$, et en prenant 1 comme coefficient de la dépense au lieu de 0,93 comme ci-dessus, la formule précédente devient :

$$Q = 2011 \sqrt{\frac{1 + 0,004t}{b + p}} \sqrt{\frac{PD^5}{L + 42D}}.$$

Des expériences faites par Girard sur une conduite de 0m,01579 de

diamètre, formée de canons de fusil adaptés bout à bout, ont donné :

$$Q = 1989\sqrt{\frac{1+0,004t}{b+p}}\sqrt{\frac{PD^5}{L+42D}}.$$

Comme, dans ce cas d'écoulement à l'air libre, on peut supposer $p=0$, et par suite $b+p=0^m,76$, en faisant $t=12°$, température moyenne de la France, on a :

$$Q = 2336\sqrt{\frac{PD^5}{L+42D}}.$$

Pour l'eau, d'Aubuisson donne pour l'expression de la dépense Q', dans les grandes vitesses :

$$Q' = 76,45\sqrt{\frac{PD^5}{L+36D}}.$$

On a donc à peu près :

$$Q' : Q = 76,45 : 2336 = 1 : 30,55.$$

C'est-à-dire que, sous une même charge, une même conduite dépense, en volume, 30,55 fois plus d'air que d'eau.

Pour un autre gaz quelconque, les dépenses Q seront obtenues en divisant les valeurs précédentes données pour l'air par $\sqrt{\delta''}$, δ'' étant la densité du gaz qui s'écoule par rapport à celle de l'air; ainsi pour le gaz de l'éclairage ce sera par $\sqrt{0,559}$.

De ses expériences sur des tuyaux en fer-blanc de $0^m,009$ de diamètre et d'une longueur qui a varié de $0^m,20$ à 1 mètre, communiquant avec le réservoir par une embouchure conique qui rendait nulle la contraction à l'entrée du tuyau, Péclet a conclu, φ étant égal à 0,024 :

$$P - p = p\,\frac{\varphi L}{D}, \quad \text{d'où} \quad p = P\,\frac{1}{1+\frac{\varphi L}{D}}. \qquad (2)$$

$P-p$ est la perte de charge due au frottement contre les parois du tuyau, et elle est interprétée comme au numéro précédent, où elle est due à la contraction de la veine. Cette perte de charge étant encore proportionnelle à p, elle l'est aussi au carré de la vitesse.

Quelques expériences faites sur des tuyaux enduits intérieurement de diverses substances font conclure à Péclet que la nature de la surface n'a pas d'influence.

Pour $d=D$, la formule (1) de d'Aubuisson revient à cette dernière. Mais, pour une conduite toute ouverte, à cause de la grandeur de la vitesse de sortie du gaz et de la variation de cette vitesse aux différents points de l'orifice, un manomètre placé près de l'extrémité de la conduite ne peut plus indiquer exactement la pression manométrique p correspondant à la vitesse de sortie u du gaz, vitesse de sortie qu'on

peut supposer égale à la vitesse d'accès, donnée par la formule $Q = Su$ (n° 350).

Lorsque les tuyaux s'appliquaient sans embouchure conique sur le réservoir, Péclet a trouvé $0,451p$ pour la perte de charge Ap due à l'entrée de l'air dans les tuyaux (350), et par suite :

$$P - p = 0,451p + p\frac{\varphi L}{D}, \quad \text{d'où} \quad p = P\frac{1}{1,451 + \frac{\varphi L}{D}}. \qquad (2')$$

Comme on a reconnu que le coefficient A diminue à mesure que L et même D augmentent, au point même d'être à peu près nul pour les grandes conduites proprement dites, on peut généralement le négliger dans la pratique près de $\frac{\varphi L}{D}$, qui augmente au contraire proportionnellement à L, et se servir de la formule (2), qui revient à (350) :

$$2gp\frac{\delta}{\delta'} = 2gP\frac{\delta}{\delta'} \times \frac{1}{1 + \frac{\varphi L}{D}}, \quad \text{ou} \quad u = \sqrt{2gP\frac{\delta}{\delta'}} \times \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{\varphi L}{D}}}.$$

δ densité du liquide placé dans le manomètre;
δ' densité de l'air comprimé;
$\sqrt{2gP\frac{\delta}{\delta'}}$ vitesse qu'on obtiendrait s'il n'y avait aucune perte de charge.

Il y a lieu de se demander si cette vitesse u se rapporte bien au gaz comprimé, ou au gaz en totalité ou en partie détendu.

Des expériences de Girard, de d'Aubuisson, et surtout de celles faites par Poncelet et enfin par Pecqueur, qui a opéré sous des excès de pressions qui se sont élevés jusqu'à 2^{atm},5, Péclet conclut que la formule précédente s'applique au gaz comprimé, du moins jusqu'à la limite des expériences de Pecqueur.

Si l'on tient compte de la perte de charge à l'entrée du tuyau, la formule (2) donne :

$$2gp\frac{\delta}{\delta'} = 2gP\frac{\delta}{\delta'} \times \frac{1}{1 + A + \frac{\varphi L}{D}}, \quad \text{ou} \quad u = \sqrt{2gP\frac{\delta}{\delta'}} \times \sqrt{\frac{1}{1 + A + \frac{\varphi L}{D}}}.$$

La *résistance des coudes* à angle vif est, d'après d'Aubuisson, sensiblement proportionnelle au carré de la vitesse du fluide, et à très peu près comme le carré du sinus de l'angle du coude, ou, puisque deux angles supplémentaires ont même sinus, comme le carré du sinus de l'angle i formé par le deuxième tuyau avec le prolongement du premier. D'après le même expérimentateur, sept coudes à 45° diminuent la dépense de 1/4.

Dans la pratique, on atténue le mauvais effet des coudes en arrondissant ceux qu'on ne peut éviter.

D'après Péclet, la perte de charge manométrique due à un coude brusque est :

$$p \sin^2 i.$$

p pression manométrique correspondant à la vitesse u;
i angle, compris entre 20° et 90°, que forme le 2e tuyau avec le prolongement du premier.

Pour n coudes de même angle i, la perte de charge manométrique est :

$$np \sin^2 i.$$

Si les coudes sont arrondis, cette perte de charge est :

$$np \frac{i}{180^\circ}.$$

i désigne dans ce cas le nombre de degrés de l'arc de chaque coude (198).

La perte de charge due aux coudes est donc aussi proportionnelle au carré de la vitesse. Pour une *conduite quelconque*, on a donc, pour la perte de charge manométrique :

$$P - p = Ap + Np + \frac{\varphi L}{D} p \quad \text{et} \quad u = \sqrt{2gP\frac{\delta}{\delta'}} \times \sqrt{\frac{1}{1 + A + N + \frac{\varphi L}{D}}}. \qquad (a)$$

$u = \sqrt{2gp\frac{\delta}{\delta'}}$ vitesse moyenne d'accès de l'air comprimé dans l'ouverture antérieure de la conduite (350) ;
$Ap = \left(\frac{1}{k^2} - 1\right)p$ perte de charge à l'origine du tuyau (350);
$Np = np \sin^2 i$ ou $Np = np \frac{i}{180}$ perte de charge due aux coudes ;
$\frac{\omega L}{D} p$ perte de charge due au frottement dans le tuyau.

La perte de charge est donc, d'une manière générale, proportionnelle à p, et, par suite, au carré de la vitesse.

Rappelons que la vitesse u d'accès à l'origine de la conduite est aussi la vitesse réelle à l'extrémité de cette conduite, et l'on voit qu'elle est égale au produit de la vitesse théorique $v = \sqrt{2gP\frac{\delta}{\delta'}}$ due à la charge manométrique P, par la quantité $\sqrt{\frac{1}{1 + A + N + \frac{\varphi L}{D}}}$, qui dépend de la forme et des dimensions de la conduite, et qu'on peut calculer. Pour une même conduite, la vitesse d'écoulement u est une même fraction de vitesse théorique v, quelle que soit la pression P.

Si le gaz en parcourant une conduite, supposée horizontale, éprouvait une variation de température, la vitesse d'écoulement à l'origine, et par

suite la dépense, ne seraient modifiées que par la variation de résistance que produirait la variation de vitesse provenant de la dilatation ou de la contraction. Cela est dû à ce que toute détente ou contraction agit également dans les deux sens, et ne peut, par conséquent, modifier ni la vitesse à l'origine ni la dépense. Quant à la vitesse à l'extrémité de la conduite, elle varierait, en négligeant la variation de résistance, proportionnellement au rapport $\frac{1+at'}{1+at}$ des volumes que prend l'unité de volume du gaz à 0° quand il passe à la température nouvelle t' et à celle primitive t (350).

MACHINES SOUFFLANTES

352. Machines soufflantes. Pour les machines soufflantes à cylindre en fonte, le rapport du volume d'air expulsé au volume engendré par le piston est égal à 0,75, et pour les machines à caisse carrée en bois, ce rapport est égal à 0,55 seulement.

Désignant par Q le volume effectif d'air, à 0° et sous la pression $0^m,76$, que doit fournir la machine en une minute, on calcule le diamètre et la course du piston pour fournir un volume :

$$Q(t + at).$$

a coefficient de dilatation de l'air, qu'on suppose égal à 0,004 (350);
t température de l'air; en France on fait $t = 20°$.

Le volume engendré par un piston cylindrique et par un piston carré est respectivement en une minute (*Int.* 854, 872):

$$\frac{1}{4}\pi D^2 ln, \quad \text{et} \quad C^2 ln.$$

D diamètre du piston cylindrique ;
l course du piston;
n nombre de coups de piston par minute;
C côté du piston carré.

On aura donc pour les deux genres de machines :

$$Q(1 + 0{,}004t) = 0{,}75\,\frac{1}{4}\pi D^2 ln, \quad \text{et} \quad Q(1 + 0{,}004t) = 0{,,}55 C^2 ln.$$

Faisant $t = 20°$, on conclut :

$$D^2 = 1{,}834\,\frac{Q}{ln}, \quad \text{et} \quad C^2 = 1{,}964\,\frac{Q}{ln}.$$

Pour les machines à cylindre, la vitesse du piston varie de $0^m,50$ à 1 mètre par seconde, et l'on fait ordinairement $l = D$.

Désignant par v la vitesse du piston, on a $nl = 60v$, et par suite :

$$D^2 = 1{,}834\,\frac{Q}{60v} = 0{,}031\,\frac{Q}{v}.$$

Pour les machines à cylindre, la section des soupapes d'aspiration varie de 1/15 à 1/12 de la section du cylindre soufflant pour des vitesses de piston comprises entre $0^m,50$ et $0^m,75$, et de 1/10 à 1/9 pour des vitesses comprises entre $0^m,75$ et 1 mètre. Il ne convient pas que la vitesse dépasse $0^m,60$.

Pour les machines à caisse carrée, la vitesse du piston varie de $0^m,25$ à $0^m,30$ par seconde, et la section des soupapes d'aspiration est comprise entre 1/15 et 1/20 de celle de la caisse.

Pour les machines à cylindre, comme pour celles à caisse, la section des soupapes d'expiration varie de 1/15 à 1/20 ou 1/22 de celle du cylindre ou de la caisse.

Les tuyaux de conduite ont une section à peu près égale à celle des soupapes d'expiration. Dans la pratique, la vitesse de l'air y est ordinairement réglée à 20 mètres par seconde.

Les pistons des caisses en bois sont mis en mouvement par des cames, et leur course n'excède pas $0^m,65$.

Le diamètre de la tige du piston varie de 1/20 à 1/17 de celui du cylindre.

La pression de l'air dans le cylindre doit être suffisante pour soulever la soupape, vaincre le frottement dans le tuyau qui conduit l'air du cylindre au régulateur, celui qui peut avoir lieu dans le régulateur, ainsi que celui qui a lieu dans le tuyau qui amène l'air du régulateur à la buse, et produire une vitesse d'écoulement convenable par la buse. D'après ce qui a été dit n° 351, on pourra calculer les différentes pertes de force élastique dues au frottement de l'air dans les tuyaux, et comme on peut, avec approximation, tenir compte de l'effet de la soupape, on aura donc la pression absolue de l'air dans le cylindre.

353. Dans une machine soufflante, l'équilibre dynamique est, pour une minute :

$$\mathcal{T}_m = \mathcal{T}_u + \mathcal{T}_r.$$

$\mathcal{T}_m$ travail moteur dépensé par minute sur la tige du piston soufflant;
$\mathcal{T}_u$ travail absorbé pour comprimer l'air à la pression P dans le cylindre, et le faire sortir de ce cylindre;
$\mathcal{T}_r$ travail absorbé par le frottement de la garniture du piston et celui de la tige dans le stuffing-box, et pour soulever les soupapes.

Pour une cylindrée, le travail dépensé est :

$$t_u = qp \times 2,3026 \log \frac{P}{p}.$$

q volume d'une cylindrée;
p pression atmosphérique; c'est sensiblement la pression de l'air derrière le piston;
2,3026 nombre par lequel il faut multiplier le logarithme vulgaire d'un nombre pour avoir son logarithme népérien (*Int.* 409).

Tant que $\frac{P}{p}$ est plus petit que 2, on peut poser :

$$2,3026 \log \frac{P}{p} = \frac{P - q}{0,50\,(P + p)},$$

et il vient : $$t_u = qp \frac{P - p}{0,50(P + p)}.$$

Pour un mètre carré de surface :

$$p = 0,76 \times 13\,596^k, \quad \text{et} \quad P = (0,76 + h)13596 \text{ kilog.}$$

h hauteur marquée par le manomètre à mercure placé sur le cylindre (Voir *Densités*, 2ᵉ partie).

Substituant ces valeurs de p et P dans celle de t_u, on a :

$$t_u = q \times 13\,596 \frac{1,52\,h}{1,52 + h}.$$

Q′ étant le volume engendré par le piston en une minute, et Q le volume de l'air à 0° et sous la pression $0^m,76$, on a :

$$Q(1 + 0,004\,t) = 0,75\,Q', \quad \text{d'où} \quad Q' = \frac{Q}{0,75}(1 + 0,004\,t).$$

On a, pour n cylindrées par minute :

$$nq = Q',$$

et par suite :

$$nt_u = \mathcal{T}_u = Q' \times 13596 \frac{1,52\,h}{1,52 + h} = \frac{Q}{0,75}(1 + 0,004\,t)\ 13\,596 \frac{1,52\,h}{1,52 + h}.$$

Le frottement de la garniture du piston dépendant de la pression, il faudrait tenir compte des variations de pression de l'air dans le cylindre ; mais il convient de supposer la pression constante et égale à h, ce qui permet de négliger le frottement de la tige dans le stuffing-box, et l'on a alors (61) :

$$\mathcal{T}_r = n\pi Dehfl,$$

d'où : $$\mathcal{T}_m = \frac{Q}{0,75}(1 + 0,004\,t)\ 13\,596 \frac{1,52\,h}{1,52 + h} + n\pi Dehfl.$$

Il convient de prendre $e = 0^m,04$ et de faire $f = 0,30$.

Le travail absorbé par le stuffing-box a la même expression que $\mathcal{T}_r$; mais e se prend alors égal au diamètre de la tige, et l'on a $f = 0,20$ environ.

D'après Thomas et Laurens, l'air que la tuyère doit projeter dans le haut fourneau est celui nécessaire à la conversion en oxyde de carbone du charbon *solide* chargé au gueulard, c'est-à-dire du charbon, déduction faite des cendres, de l'eau et des matières volatiles.

Un kilogramme de charbon solide exigeant $4^{mc},41$ d'air à 0° sous la pression $0^m,76$ pour sa conversion en oxyde, comme le charbon de bois moyen contient 0,07 d'eau, 0,025 de cendres et 0,14 de matières volatiles, chaque kilogramme de charbon chargé au gueulard exigera $4,41 \times 0,765 = 3^{mc},374$ d'air.

Le coke moyen contenant 0,05 d'eau, 0,03 de matières volatiles et

0,12 de cendres, les tuyères devront envoyer $4,41 \times 0,80 = 3^{mc},528$ d'air à 0° et à la pression $0^{m},76$ par chaque kilogramme de coke chargé au gueulard.

De ces nombres, il résulte que, pour une marche régulière, la tuyère doit envoyer par minute $11^{mc},241$ d'air, à 0° et à la pression $0^{m},76$, dans un haut fourneau produisant 4000 kilog. de fonte par jour avec une consommation de 1 200 kilog. de charbon de bois par tonne. Ce volume d'air est de $68^{mc},600$ pour un haut fourneau produisant 20 tonnes de fonte par jour avec une consommation de 1 400 kilog. de coke par tonne.

Si l'on avait à craindre des pertes par suite d'un refoulement de l'air à la tuyère, on y obvierait en portant la consommation de $4^{mc},41$ à $4^{mc},60$.

La capacité utile d'un régulateur à eau varie de dix à douze fois celle du cylindre soufflant; sa section horizontale se fait égale à celle de l'eau environnante. L'eau doit toujours s'élever à $0^{m},30$ au-dessus de l'arête inférieure du régulateur, afin qu'on soit assuré qu'il ne s'échappera pas d'air. La capacité d'un régulateur à cylindre flottant varie de deux à trois fois celle du cylindre soufflant; celle d'un régulateur à capacité constante varie de vingt à vingt-cinq fois celle de ce cylindre.

VENTILATEURS

354. Ventilateurs. Un ventilateur peut avoir pour but d'aspirer de l'air chargé de poussière ou de gaz délétère d'un lieu habité, d'une usine, d'une mine, etc. Dans ce cas, il porte, sur l'une ou chacune de ses joues, une ouverture qui communique avec le tuyau d'amenée de l'air vicié, et cet air est chassé librement dans l'atmosphère dans toute l'étendue de la surface cylindrique que décrivent les extrémités des ailes. Le ventilateur est alors dit *aspirant*. Un ventilateur peut avoir au contraire pour but d'aspirer librement de l'air par ses joues, pour le refouler par un tuyau dans une mine, dans un lieu habité ou dans les tuyères de cubilots ou de forges maréchales; dans ce cas, il est dit *soufflant*, et il est entouré sur tout son pourtour par une enveloppe cylindrique de laquelle part le tuyau conducteur de l'air (324). La théorie a conduit Combes à courber les ailes (*Traité de l'exploitation des mines*), et M. Tournaire a fait construire un ventilateur à ailes courbes, dont il a donné la théorie et les résultats fournis par l'expérience (*Annales des mines*, 1860). (Voir page 406 un résumé de ces résultats.) A cause de la plus grande facilité de construction, les ventilateurs sont quelquefois encore à ailes planes, dont le nombre est ordinairement 4 ou 6. Dans certains systèmes, on incline les ailes planes à 40° ou 45° sur le rayon du côté opposé au mouvement.

Il convient que les passages de l'air soient convenablement raccordés entre eux par des courbures continues; que les ouvertures des joues aient à peu près une section égale aux orifices d'entrée entre les ailes, afin que l'air arrive facilement et que cependant le remous soit nul ou au moins très faible; enfin que les canaux formés par les ailes aient en

chaque point une section à peu près inverse de la vitesse de l'air en ce point, vitesse que l'on peut considérer comme proportionnelle à la vitesse de rotation de ce point. On diminue ainsi les pertes de puissance vive, et l'on recule la limite de vitesse à laquelle le ventilateur commence à faire du bruit au delà de la vitesse qui convient à la pratique.

On a expérimenté, au Conservatoire des arts et métiers, divers ventilateurs; des résultats obtenus, et publiés par Morin dans les *Annales du Conservatoire* (1861), nous extrayons les suivants :

Ventilateurs soumis à l'expérience :

1° Deux ventilateurs à palettes courbes, système de Lloyd, l'un aspirant et l'autre soufflant. Ils ne produisent à peu près aucun ronflement jusqu'à la vitesse de 800 à 1 000 tours. Les palettes, au nombre de 6, sont limitées et réglées à deux plateaux tronconiques, tels que la longueur des palettes, mesurée parallèlement à l'axe, ne soit à l'extrémité que la moitié ou même le quart de la longueur à l'entrée. Lloyd adopte environ le quart; mais pour le ventilateur soufflant Cail, essayé au Conservatoire, on a adopté environ la moitié.

Les deux plateaux tronconiques tournent avec les ailes, qui sont reliées à l'arbre par des bras ou par un disque qui divise en deux parties égales les canaux formés par les ailes.

Le ventilateur soufflant Cail a $0^m,770$ de diamètre à l'extérieur des ailettes, et le diamètre intérieur de l'enveloppe est de $0^m,901$ à $1^m,015$, par suite du jeu autour des ailettes, qui varie de $0^m,016$ à $0^m,160$.

2° Un ventilateur soufflant à palettes planes ayant les dimensions suivantes :

Diamètre à l'extrémité des palettes	$0^m,67$
Diamètre intérieur	0 ,31
Longueur des palettes parallèlement à l'axe	0 ,33
Diamètre intérieur de l'enveloppe	0 ,75
Jeu uniforme entre la circonférence extérieure et l'enveloppe qui n'est pas excentrée	0 ,04

3° Deux ventilateurs à hélices du système Guérin; ils ont donné, soit par aspiration, soit par insufflation, des résultats inférieurs aux précédents.

A ces divers ventilateurs on avait adapté un tuyau en tôle par lequel on aspirait ou insufflait l'air, selon qu'il s'agissait d'un ventilateur aspirant ou soufflant. Ce tuyau avait $0^m,30$ de diamètre, soit $0^{mq},07$ de section, et sa longueur a été portée jusqu'à 28 mètres. Ce tuyau étant entièrement ouvert à son extrémité, le *volume d'air aspiré ou insufflé* est proportionnel, pour un même ventilateur, au nombre de tours du ventilateur; ainsi l'on a :

$$Q = KN. \qquad (a)$$

Q volume d'air aspiré ou insufflé par minute, en mètres cubes;
N nombre de tours du ventilateur par minute;
K coefficient que l'on peut considérer comme constant pour un même ventilateur, et dont le tableau (355) donne la valeur.

Adoptant comme *effet utile* du ventilateur la puissance vive que pos-

sède l'air qui sort du tuyau en une seconde, il est (30) :

$$\frac{1}{2}\,\frac{Q\delta}{60 \times g}\,V^2.$$

$\delta = 1{,}3$ poids du mètre cube d'air en kilogrammes (voir : *Densités*, 2ᵉ partie) ;

$\frac{Q\delta}{60}$ poids de l'air écoulé par seconde ;

$V = \frac{Q}{60\frac{\pi D^2}{4}} = \frac{Q}{15\pi D^2}$ vitesse de l'air dans le tuyau de conduite, dont D est le diamètre ;

Le *rendement* R, c'est-à-dire le rapport de l'effet utile précédent au travail moteur dépensé pour faire mouvoir le ventilateur, a pris les valeurs de la 4ᵉ colonne du tableau suivant.

Le *volume engendré par les ailes* du ventilateur, par minute, est :

$$Q' = S \times 2\pi\rho N. \qquad (b)$$

S surface d'une aile ou mieux de la section du volume annulaire qu'elle engendre par un plan passant par l'axe ;

ρ distance du centre de gravité de la surface S à l'axe.

Le *rendement* R' *en volume* du ventilateur est :

$$R' = \frac{Q}{Q'}. \qquad (c)$$

Les valeurs de R' sont consignées dans la 3ᵉ colonne du tableau suivant.

355. *Tableau des résultats fournis par quelques ventilateurs.*

VENTILATEURS.		COEFFICIENT K.	RENDEMENT en volume R'.	RENDEMENT en effet utile R.
Ventilateur aspirant de Lloyd		0,0744	1,400	0,120
Ventilateur soufflant *id.*		0,098	2,900	0,160
Ventilateur soufflant à palettes planes.	Tuyau tout ouvert, comme dans les deux cas précédents	0,099	1,088	0,161
	Orifice de sortie de 0ᵐ,20 de diam.	0,066	0,733	»
	Id. de 0 ,14 *id.*	0,035	0,388	»
	Id. de 0 ,081 *id.*	0,019	0,267	»

Pour établir un ventilateur devant aspirer ou insuffler un volume Q d'air, des formules (*a*) et (*c*) on tire respectivement :

$$N = \frac{Q}{K}, \quad \text{et} \quad Q' = \frac{Q}{R'}.$$

Ces valeurs de N et Q', substituées dans l'équation (*b*), donnent :

$$\frac{Q}{R'} = S \times 2\pi\rho\frac{Q}{K}, \quad \text{ou} \quad \rho S = \frac{K}{2\pi R'}.$$

Le problème est alors ramené à étudier, à l'aide d'une épure, une palette qui donne le produit ρS égal au second membre connu de cette dernière équation.

356. Pression de l'air en différents points de la longueur du tuyau, ce tuyau étant entièrement ouvert ou terminé par des orifices de divers diamètres. Cette pression a été déterminée pour le ventilateur à ailes planes, à l'aide de manomètres formés par un tube de verre recourbé dont la branche horizontale avait son extrémité antérieure effilée. Les branches horizontales ont été placées dans l'axe du tuyau de refoulement, de manière à présenter leur orifice d'entrée à l'action de ce courant. On a aussi disposé des manomètres de manière que, l'ouverture étant toujours vers l'axe du tuyau, la branche horizontale soit perpendiculaire à cet axe.

La dénivellation d'eau produite dans chaque manomètre est consignée dans le tableau suivant :

ORIFICE DE SORTIE.	Nombre de tours du ventilateur par minute.	Vitesse de l'air à la sortie du tuyau indiquée par l'anémomètre.	DÉNIVELLATIONS INDIQUÉES PAR LE MANOMÈTRE PLACÉ suivant l'axe du tuyau aux distances de :						perpendiculairement à l'axe aux distances du ventilateur de :	
			3^m,10	6^m,50.	9^m,50.	12^m,70	15^m,90	27^m,00	3^m,10.	27^m,00.
		mèt.	mèt.	mèt.	mèt.	mèt.	mèt.	mèt.	mèt.	mèt.
Diam^{tre} 0^m,30, sect. 0^{mq},07. .	848	»	0,057	0,048	0,042	0,039	0,034	0,021	0,013	−0,029
— 0 ,20, — 0 ,0314.	820	28,76	0,052	0,048	0,052	0,048	0,048	0,048	0,040	+0,031
— 0 ,14, — 0 ,0154.	384	14,12	0,009	0,009	0,012	0,014	0,015	0 014	0,010	0,011
Id.	508	18,16	0,012	0,011	0,020	0,020	0.020	0,022	0,017	0,018
Id.	632	21,84	0,027	0,026	0,030	0,027	0,028	0,033	0,026	0,031
Id.	808	30,57	»	0,054	0,057	0,054	0,055	0,055	0,050	0,052
Diam^{tre} 0^m,081 sect. 0^{mq},0050.	392	13,92	0,010	0,013	0,015	0,014	0,015	0,017	0,013	0,012
Id.	496	17,35	0,018	0,021	0,021	0,020	0·022	0,023	0,020	0,021
Id.	624	19,47	0,028	0,029	0,031	0,029	0,031	0,034	0,029	0,032

L'inspection de ce tableau montre :

1° Que si le tuyau est tout ouvert, la dénivellation diminue depuis le ventilateur jusqu'à l'extrémité du tuyau, et que la dénivellation est plus faible pour les manomètres placés perpendiculairement à l'axe que pour ceux placés suivant l'axe; qu'elle est même négative pour le manomètre placé à 27 mètres du ventilateur, près de l'extrémité du tuyau;

2° Que si l'orifice de sortie est rétréci, la dénivellation est sensiblement la même dans toute l'étendue du tuyau; qu'à la même vitesse du ventilateur la dénivellation dépend peu de la dimension de l'orifice de sortie; enfin que la dénivellation est à peu près la même, que les manomètres soient placés suivant l'axe ou perpendiculairement à l'axe.

De là il résulte qu'en ouvrant en divers points de la conduite d'air

différents orifices, pour alimenter des tuyères par exemple, tant que la section totale des orifices n'atteint pas une certaine limite, rien n'est sensiblement changé, ni dans la marche du ventilateur, ni dans la pression et par suite la vitesse d'écoulement de l'air. C'est ce qui résulte également des expériences faites par M. Tournaire. Cet ingénieur, en faisant fonctionner son ventilateur tout ouvert sur son pourtour dans une grande caisse rectangulaire en bois hermétiquement fermée, a remarqué que la pression devenait la même en tous les points de la surface de la caisse, ce qui indique qu'il n'est pas absolument nécessaire d'excentrer le ventilateur, et en ouvrant un plus ou moins grand nombre d'orifices de $0^m,10$ de diamètre en divers points de la caisse, la pression n'a pas diminué très rapidemement, comme l'indique le tableau suivant :

NOMBRE DE TOURS du ventilateur par minute.	NOMBRE d'orifices ouverts.	DÉNIVELLATION de l'eau du manomètre.	VOLUME D'AIR écoulé par seconde.	RENDEMENT R.
		millim.	m. cub.	
»	2	298	0,661	0,24
1714	3	279	0,965	0,33
»	4	256	1,242	0,40
1708	5	262	1,558	»
1655	6	241	1,808	0,46
1622	7	226	2,041	»
»	8	210	2,265	0,50
1557	9	190	2,439	*id.*
1538	10	164	2,522	*id.*
1524	11	150	2,685	*id.*
1500	12	136	2,815	*id.*

Comme le montre la dernière colonne de ce tableau, les rendements en effet utile fournis par le ventilateur de M. Tournaire sont considérables relativement à ceux obtenus au Conservatoire; la différence est même si grande, que l'on est porté à supposer que les méthodes par lesquelles on les a appréciés ont exagéré les uns ou diminué les autres; il est prudent de ne compter que sur un rendement de 0,16.

Dimensions du ventilateur de M. Tournaire :

Diamètre à l'extérieur des ailes. . . . . $0^m,85$
Id. à l'intérieur des ailes. . . . . 0 ,48

Le nombre des ailes est 10; elles font des angles constants de 20° avec toute circonférence concentrique au ventilateur. Leur longueur, parallèlement à l'axe, est de $0^m,15$ environ à l'entrée, et de $0^m,10$ environ à la sortie. Les canaux qu'elles forment sont divisés en deux parties égales par un disque qui sert de bras au ventilateur.

30 directrices fixes en tôle amènent l'air suivant le rayon à l'entrée entre les ailes.

D'après M. Tournaire, quand on emploie ce ventilateur pour insuffler de l'air, on l'enveloppe d'un cylindre en tôle adapté hermétiquement aux parois externes des pavillons, et qui renferme la couronne mobile formée par les ailes et les plateaux tronconiques qui les termi-

nent. Il importe que ce cylindre n'enveloppe pas la roue d'une manière étroite, mais qu'elle offre assez de largeur pour que l'air foulé par les ailes puisse s'écouler librement sur tout leur pourtour. Sa section annulaire ne doit cependant pas être plus grande que la section de la conduite. Les enveloppes excentrées, dont on fait souvent usage, et qui ont donné de bons résultats, peuvent être appliquées à ce ventilateur.

Pour un ventilateur ordinaire à ailes planes, il convient de faire le diamètre extérieur du ventilateur à peu près double du diamètre intérieur. La distance des joues doit être égale au rayon intérieur si l'air arrive par les deux joues, et à la moitié si l'air n'arrive que par un côté. Ordinairement le nombre des ailes est 6.

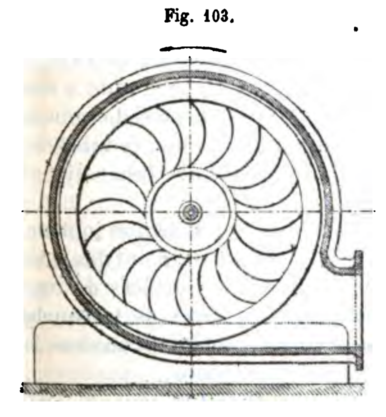
Résultats fournis par deux ventilateurs soufflants, à ailes planes légèrement inclinées sur le rayon.

NOMBRE d'ailes.	DIAMÈTRE extérieur.	DIAMÈTRE intérieur.	ÉCARTEMENT des joues.	CUBILOTS desservis.	NOMBRE de tours en 1'.	FORCE en chevaux-vapeur.	PRODUIT TOTAL en fonte par heure.
	m.	m.	m.				kilogr.
6	1,0	0,50	0,20	2	1000	4	4000
»	1,4	0,40	0,35	2	600	4	»

Il convient de faire aspirer les ventilateurs par les deux joues, et de tenir leur diamètre entre les limites $0^m,90$ et $1^m,10$ pour les plus simples à ailes planes.

357. Ventilateurs Farcot. Le ventilateur *soufflant* Farcot-d'Anthonay (*fig.* 103) se compose d'une turbine à aubes recourbées dans le sens de la rotation et trapézoïdales dans le sens de l'axe. Elles laissent entre elles, à la circonférence, un espace annulaire formant un réservoir d'air en pression, ce qui permet d'avoir un écoulement uniforme et un fonctionnement silencieux, sans ronflement. Le rendement atteint 70 p. 100 lorsque la section de débit utile est égale à la moitié de la section de la buse. Cette dernière section est égale à la section d'ouverture, sur le pourtour de la turbine. Ce ventilateur, à *haute pression*, est destiné aux forges, fonderies, raffineries, etc. La courbure de la partie active des ailes doit être, d'après Em. Farcot, une spirale logarithmique de la forme $\omega = \log \text{nat}\, \rho$, ou $\rho = e^{\omega}$, dans laquelle la tangente fait un angle constant de 45° avec le rayon vecteur.

Fig. 103.



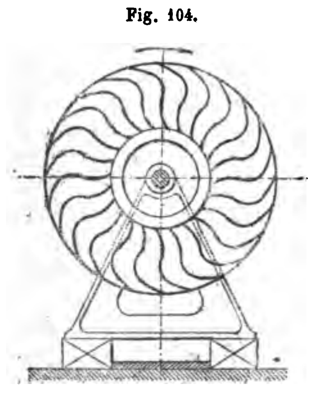
Le tableau suivant indique les dimensions et les conditions de marche de ces ventilateurs soufflants (à haute pression) :

DIAMÈTRE DE LA TURBINE en mètres.	DIAMÈTRE DE LA BUSE en mètres.	SECTION DE LA BUSE ou section de débit en mètres carrés.	Pression mesurée au manomètre à eau, en millimètres.								
			30^{mm}	60^{mm}	100^{mm}	150^{mm}	200^{mm}	250^{mm}	300^{mm}	400^{mm}	500^{mm}
			Vitesse d'écoulement de l'air, correspondante à la pression, en mètres par seconde.								
			$21^m,30$	$30^m,12$	$38^m,89$	$47^m,62$	55^m	$61^m,59$	$67^m,36$	$77^m,78$	$86^m,98$
			Nombre de tours par minute, correspondant à la pression.								
mèt.	mèt.	m. carr.									
0,37	0,113	0,010	1150	1600	2100	2500	2950	3250	3530	»	»
0,46	0,134	0,015	950	1300	1700	2000	2300	2600	2830	3300	»
0,60	0,160	0.020	700	1000	1300	1600	1880	2000	2200	2600	2900
0,70	0,195	0.030	600	850	1100	1300	1550	1700	1900	2200	2400
0,85	0,230	0,040	500	700	900	1100	1250	1450	1550	1750	2000
1,00	0,275	0,060	450	600	800	950	1100	1200	1300	1500	1700
1,10	0,310	0,075	400	550	700	850	980	1100	1200	1400	1500
1,27	0,340	0,090	350	500	600	750	850	950	1050	1200	1350
1,50	0,390	0,120	300	400	500	650	750	800	900	1000	1150
1,75	0,500	0,200	250	350	450	550	620	700	750	850	950
2,00	0,620	0,300	225	300	400	470	550	630	700	800	860
2,50	0,800	0,500	180	245	300	385	420	470	520	600	680

La maison d'Anthonay, à Paris, fabrique des ventilateurs soufflants jusqu'à une vitesse d'air de 123 mètres par seconde, et pouvant débiter jusqu'à 222 000 mètres cubes d'air à l'heure (soit $61^{mc},5$ par seconde).

Il existe un autre ventilateur Farcot, à *basse pression* (*aspirant*), tournant librement dans l'air sans enveloppe ou avec enveloppe en tôle. Il se compose (*fig.* 104) d'une turbine dont les aubes métalliques, de la forme ci-jointe et trapézoïdales dans le sens de l'axe, se prolongent pour former une roue à réaction, inclinée en sens inverse du mouvement de rotation, ce qui ne produit l'évacuation de l'air qu'avec une très petite vitesse.

Fig. 104.



La pression ou la dépression obtenue correspond à la vitesse du point des aubes situé à la naissance des orifices de réaction, c'est-à-dire au jarret de la courbe. Le diamètre correspondant est environ les 8/10 du diamètre extérieur.

Ces ventilateurs aspirants sont employés pour l'aération des mines, des ateliers, la ventilation des édifices, des carrières, etc. Ils se construisent simples ou doubles, c'est-à-dire avec des aubes d'un seul ou des deux côtés du disque principal. Ils sont mis en marche par des poulies de commande.

Le tableau suivant donne les dimensions et les volumes d'air débités par les ventilateurs aspirants doubles; pour les ventilateurs simples, de dimensions semblables, les volumes débités sont moitié.

Diamètre de la turbine, en mètres		$0^{m},50$	$0^{m},90$	$1^{m},10$	$1^{m},25$	$1^{m},40$	$1^{m},60$	$2^{m},00$	$4^{m},00$
Diamètre d'un œillard. . .		$0^{m},20$	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	$1^{m},60$
Section d'un œillard. . . .		$0^{m2},0314$	0,070	0,126	0,196	0,280	0,385	0,500	$2^{m2},00$
		m. cubes	m. cub.	m. cub.	m. cub.	m. cub.	m. cub.	m. cub.	m. cub.
Volumes en mètres cubes débités par heure (**gros chiffres**) et par seconde (petits chiffres), pour des vitesses d'air à l'œillard, par seconde, de :	$8^{m},70$	**1950** 0,50	**4400** 1,20	**7900** 2,00	**12300** 3,50	**17500** 5,00	**22700** 6,50	**31500** 8,50	**126000** 35,00
	$12^{m},59$	**2780** 0,70	**6320** 1,70	**11400** 3,00	**17600** 5,00	**25000** 7,00	**33200** 9,00	**45000** 12,50	**180000** 50,00
	$15^{m},40$	**3280** 0,90	**7520** 2,00	**13600** 3,70	**21000** 5,80	**30000** 8,40	**41800** 11,50	**54000** 15,00	**216000** 60,00
	$19^{m},62$	**4480** 1,20	**10120** 2,80	**18200** 5,00	**28200** 7,80	**40000** 11,20	**55400** 15,50	**73600** 20,50	**288000** 80,00
	$28^{m},20$	**5900** 1,70	**13800** 3,80	**24800** 7,00	**38800** 10,70	**55400** 15,50	**75000** 20,50	**99000** 27,50	**396000** 109,00
	$39^{m},84$	**8960** 2,50	**20240** 5,60	**36400** 10,00	**56400** 15,50	**80000** 22,50	**110800** 31,00	**147200** 40,50	**558000** 155,00
Nombre de tours par minute, pour des dépressions d'eau en millimètres de : (correspondant aux vitesses ci-dessus).	5^{mm}	400	250	200	150	130	120	100	50
	10	575	325	260	225	200	175	140	63
	15	690	390	315	270	240	210	170	75
	25	910	510	410	350	310	270	215	110
	50	1260	700	580	490	440	400	310	160
	100	1780	1000	825	685	625	560	445	220

358. Ventilateur Roots. Ce ventilateur diffère essentiellement des précédents; au lieu de palettes ou d'ailes ordinaires, il comprend deux véritables roues d'engrenage, n'ayant chacune que deux dents, et qui tournent ensemble dans une boîte alésée, avec le moins de jeu possible. Les parties extérieures des grandes dents constituent des pistons qui refoulent l'air vers la buse de sortie.

Une roue d'engrenage ordinaire est montée à chaque extrémité de chaque roue-piston (soit 4 en tout); ces engrenages assurent la concordance du mouvement de chaque pièce intérieure.

Comme pour les autres systèmes de ventilateurs, celui de Roots doit être mis en marche par une commande; mais son installation diffère des précédents en ce que deux poulies sont nécessaires pour le faire fonctionner, chacune commandant une roue; de plus, ces deux roues doivent tourner en sens contraire. Cet appareil a une grande analogie avec la pompe rotative de Greindl (325); il peut refouler de l'air jusqu'à

1m,50 de hauteur d'eau. Une soupape attenante à la boîte alésée règle la limite de pression.

La surface des palettes peut être en fonte ou en bois paraffiné et graissé.

Ces ventilateurs sont construits par **MM. Heilmann, Ducommun et Steinlein, de Mulhouse.**

(Voir VENTILATION, à la 2e partie.)

RÉSISTANCE DES MATÉRIAUX

359. Généralités sur les diverses sortes d'efforts et les déformations que subissent les matériaux dans les constructions et les machines. Les corps solides, tels que les bois, les métaux, les pierres, les briques, etc., qui entrent soit dans les constructions, soit dans les machines, subissent diverses sortes d'efforts sous l'action des forces extérieures qui les sollicitent.

Il en résulte, en général, une déformation plus ou moins sensible des matériaux, et en même temps il se produit, à l'intérieur de ces matériaux, des réactions moléculaires qui, tout en s'opposant à leur déformation, font équilibre aux forces extérieures. Si les forces extérieures l'emportent sur les efforts moléculaires, les matériaux se rompent. Pratiquement, les dimensions des matériaux doivent être non seulement suffisantes pour éviter toute rupture, mais encore pour assurer la sécurité, la stabilité de l'ouvrage et pour éviter des déformations sensibles.

Les divers efforts auxquels les matériaux doivent résister sont :

1° *Les efforts de traction* qui tendent à les allonger dans un sens déterminé; exemples : une corde, une chaîne, une tringle portant un poids, ou bien, dans une construction en pierre, les pièces ou tringles de chaînage s'opposant à la poussée et à l'écartement des murs.

2° *Les efforts de compression* qui tendent à raccourcir les matériaux dans un sens déterminé. Tels sont les efforts que supportent les piliers en pierre, en brique, les poteaux en bois et les colonnes métalliques, supportant une construction.

3° *Les efforts de flexion plane* qui se produisent dans les solives d'un plancher, chargées transversalement à leur longueur; lesquels efforts ont pour effet de courber les poutres et les solives (de les faire flamber) et de les faire onduler. Les efforts de flexion se produisent aussi dans les combles, ainsi que les efforts de traction et de compression.

4° *Les efforts tranchants* ou *de cisaillement* qui tendent à couper, à trancher les pièces transversalement par rapport à leur plus grande dimension. Tels sont les efforts que supportent les rivets et les boulons qui réunissent des tôles placées bout à bout, lorsque ces tôles subissent des efforts dans leur plan, ayant pour tendance de désunir les tôles et de couper les rivets et boulons.

L'effort tranchant se produit aussi dans une solive, une poutre et un arbalétrier chargés transversalement. Cet effort existe dans toutes les

sections transversales de ces pièces, et il atteint son maximum aux points d'appui et tout près des assemblages.

5° *Les efforts de torsion* sont ceux que subit un prisme, le plus souvent un cylindre, sollicité par des forces situées dans un plan perpendiculaire à l'axe du cylindre, et qui ont pour tendance de tordre la pièce, c'est-à-dire de faire tourner les unes sur les autres les tranches transversales de cette pièce. Tels sont les arbres de machines portant des roues d'engrenage ou des volants ou des organes tournant autour de ces arbres. Ces arbres subissent en même temps des efforts de flexion et de torsion et souvent des efforts longitudinaux. Ils doivent être calculés pour résister à tous ces efforts.

Tels sont, avec ceux de *glissement*, les principaux efforts que l'on a à considérer dans la résistance des matériaux. Il nous reste à passer en revue les expériences et les formules relatives à la résistance des matériaux, d'après lesquelles on détermine leurs dimensions au double point de vue de l'emploi économique des matériaux et de la sécurité des constructions.

360. Résistance à la traction. Lorsqu'un corps solide prismatique homogène est tiré dans le sens de sa longueur, il s'allonge d'une certaine quantité, variable pour chaque nature de corps, mais proportionnelle, pour une même matière, à la longueur de la pièce et à l'effort de traction, et inversement proportionnelle à la section transversale de cette pièce.

Cette loi, *très approximative*, n'est admissible qu'autant que la charge ne produit pas un allongement supérieur à celui que peut atteindre la pièce sans cesser de reprendre très sensiblement sa longueur primitive quand l'effort cesse son action. Ce plus grand allongement correspond à ce qu'on appelle *la limite d'élasticité*, limite qu'il ne faut jamais dépasser ni même atteindre dans la pratique.

Dans la limite d'élasticité, on a, pour une tige prismatique homogène de 1 mètre de longueur et de 1 millimètre carré de section :

$$E = \frac{p}{i}, \quad \text{d'où} \quad i = \frac{p}{E} \quad \text{et} \quad p = iE. \qquad (1)$$

E *coefficient* ou *module d'élasticité* de la matière dont la tige est formée ; c'est le rapport, constant jusqu'à la limite d'élasticité, de l'effort p qui tend à allonger la tige, à l'allongement i de la tige. Si la section de la tige était de 1 mètre carré, la valeur de E serait évidemment un million de fois plus grande.

Pour une tige prismatique d'une section A, d'une longueur L et soumise à une charge P, l'allongement I serait :

$$I = i \times \frac{P}{p} \times \frac{L}{1} \times \frac{1}{A} = \frac{PL}{EA}. \qquad (a)$$

La formule ci-dessus (1) donne pour $i = 1$ mètre, $E = p$; il en résulte que le module d'élasticité d'une substance donnée est numériquement égal à la charge qui serait nécessaire pour doubler la longueur d'un prisme (par extension) de 1 mètre carré de section, si la loi de proportionnalité entre les charges et les allongements se prolongeait jusqu'à

DÉSIGNATION DES CORPS.	VALEUR de i.	VALEUR DE p pour 1 millim. carré de section.	VALEUR DE E. pour 1 millim. carré de section.
	m.	kil.	kil.
Chêne.	$\frac{1}{600}=0,00167$	2,00	1200
Sapin jaune ou blanc.	$\frac{1}{850}=0,00117$	2,17	1854
Sapin rouge ou pin.	$\frac{1}{470}=0,00210$	3,15	1500
Mélèze ou larix.	$\frac{1}{520}=0,00192$	1,73	900
Hêtre rouge.	$\frac{1}{570}=0,00175$	1,63	930
Frêne.	$\frac{1}{885}=0,00113$	1,27	1120
Orme.	$\frac{1}{414}=0,00242$	2,35	970
Fers doux passés à la filière, de petites dimensions.	$\frac{1}{1250}=0,00080$	14,75	18000
Fers en barres.	$\frac{1}{1520}=0,00066$	12,205	20000
Fers du Berry { étirés*. . . .	»	»	20869
Fers du Berry { recuits*. . . .	»	»	20784
Acier d'Allemagne, très bonne qualité, recuit à l'huile. . . .	$\frac{1}{835}=0,00120$	25,00	21000
Acier fondu très fin, trempé, recuit à l'huile.	$\frac{1}{4500}=0,000222$	66,00	30000
Acier fondu. . . { étiré*.	»	»	19549
Acier fondu. . . { recuit*. . . .	»	»	19561
Acier anglais en fil. { étiré*.	»	»	18809
Acier anglais en fil. { recuit*. . . .	»	»	17278
Acier ordinaire recuit au blanc*.	»	»	18045
Fonte de fer à grains fins. . . .	$\frac{1}{1200}=0,00083$	10,00	12000
Fonte grise ordinaire, anglaise, bonne qualité.	$\frac{1}{1400}=0,00078$	6,00	9096
Fils de cuivre { étirés*. . . .	»	»	12000
Fils de cuivre { recuits*. . . .	»	»	10500
Fils de laiton recuits.	$\frac{1}{742}=0,00135$	15,00	10000
Laiton fondu.	$\frac{1}{1320}=0,00076$	4,80	6450
Bronze de canon fondu.	$\frac{1}{1590}=0,00063$	2,00	3200
Fil de plomb de coupelle, étiré à froid, de 4 mill. de diamètre.	$\frac{1}{1490}=0,00067$	0,40	600
Fil de plomb impur, du commerce, étiré à froid, de 6 millimètres de diamètre.	$\frac{1}{2000}=0,00050$	0,40	800
Plomb fondu ordinaire.	$\frac{1}{477}=0,00210$	1,00	500
Étain*.	»	»	3200
Zinc*.	»	»	9600
Or étiré*.	»	»	8131
Or recuit*.	»	»	5585
Argent étiré*.	»	»	7358
Argent recuit*.	»	»	7140
Platine, fil moyen*.	»	»	17044
Platine, fil moyen, recuit*. . .	»	»	15518

* Expériences de M. Wertheim.

cette limite du phénomène d'extension. Pratiquement, les allongements ne sont que des fractions très petites de la longueur primitive.

Des considérations analogues peuvent être données pour la compression et conduiraient aux mêmes formules.

361. Poncelet a formé le tableau (p. 412), qui donne, pour différentes substances, les valeurs moyennes de E, ainsi que celles de i et p correspondant à la limite d'élasticité de ces matières.

Application. Soit à déterminer l'allongement I d'une barre de fer d'une section A = 500 millimètres carrés, d'une longueur L = 8 mètres, la traction P étant de 3 000 kilog. Le tableau précédent donne E = 20000, et remplaçant les lettres par leurs valeurs dans la formule (a), on a :

$$I = \frac{3000 \times 8}{20000 \times 500} = 0^{m},0024.$$

Si la section est exprimée en mètres carrés, il faudra prendre pour dénominateur : $20 \times 10^9 \times 0,000500$.

Dans la pratique, il convient de ne soumettre les pièces qu'on ne peut éprouver directement avant leur emploi, qu'à des charges permanentes qui ne dépassent pas la moitié de celles p correspondant à la limite d'élasticité ; on ne devra dépasser cette moitié que pour les cas de constructions non permanentes et non soumises à des efforts longtemps prolongés, et il ne convient, dans aucun cas, que les charges dépassent les 3/4 de celles correspondant à cette limite. Il convient, toutes les fois que cela est possible, de faire usage de cette règle pour déterminer les dimensions des pièces de construction.

362. Nous citons ci-après les résultats des expériences anciennes de MM. Chevandier et Wertheim qui ont conservé toute leur valeur.

DÉSIGNATION DES BOIS.	VALEUR DE i.	VALEUR DE p pour 1 millimètre carré de section.	VALEUR DE E pour 1 millimètre carré de section.
	mèt.	kil.	kil.
Acacia	0,00253	3,188	1261,9
Sapin	0,00193	2,153	1113,2
Charme	0,00118	1,282	1085,7
Bouleau	0,00162	1,617	997,2
Hêtre	0,00236	2,317	980,4
Chêne à glands pédonculés	»	»	977,8
Chêne à glands sessiles	0,00254	2,349	921,8
Pin sylvestre	0,00289	1,633	564,1
Orme	0,00158	1,842	1165,3
Sycomore	0,00098	1,139	1163,8
Frêne	0,00111	1,246	1121,4
Aune	0,00101	1,121	1108,1
Tremble	0,00096	1,035	1075,9
Erable	0,00105	1,068	1021,4
Peuplier	0,00195	1,007	517,2

363. Autres résultats d'expériences à la traction faites sur les bois des Vosges.

VALEURS du coefficient d'élasticité et de la charge de rupture par millimètre carré, dans les deux sens perpendiculaires aux fibres (bois des Vosges).

DÉSIGNATION DES BOIS	VALEUR DE E.		CHARGE DE RUPTURE	
	Dans le sens du rayon.	Dans le sens perpendiculaire au rayon du cylindre.	Dans le sens du rayon.	Dans le sens perpendiculaire au rayon du cylindre.
	kil.	kil.	kil.	kil.
Charme.	208,4	103,4	1,007	0,608
Tremble..	107,6	43,7	0,171	0,414
Aune.	98,3	59,4	0,329	0,175
Sycomore.	134,9	80,5	0,522	0,610
Erable.	157,1	72,7	0,716	0,371
Chêne.	188,7	129,8	0,582	0,406
Bouleau.	81,1	155,2	0,823	1,063
Hêtre.	269,7	159,3	0,885	0,752
Frêne.	111,3	102,0	0,218	0,408
Orme.	122,6	63,4	0,345	0,366
Peuplier..	73,3	38,9	0,146	0,214
Acacia.	170,3	152,2	»	1,321
Sapin.	94,5	34,1	0,220	0,297
Pin sylvestre.	97,7	28,6	0,256	0,196

364. Effort de rupture par traction. Résultats d'expériences. L'effort P qui peut produire la rupture d'une pièce, en agissant dans le sens de sa longueur, est exprimé par la formule :

$$P = AR.$$

A section transversale de la pièce ;
R effort nécessaire pour rompre une tige de même matière que la pièce et dont la section est l'unité prise pour exprimer A.

Tableau des valeurs de R *pour différentes substances.*

DÉSIGNATION DES MATIÈRES.		VALEUR de R pour 1 millimètre carré de section.	EFFORT d'une grande sécurité en pratique pour 1 mil. q.
1° BOIS (*a*).		kil.	kil.
Chêne dans le sens des fibres.	fort.	8,00	0,800
	faible.	6,00	0,600
Tremble,	*id.*	6,00 à 7,00	0,60 à 0,70
Sapin,	*id.*	8,00 à 9,00	0,80 à 0,90
Sapin des Vosges,	*id.*	4,00	0,400
Pin sylvestre des Vosges,	*id.*	2,48	0,248
Frêne,	*id.*	12,00	1,200
Frêne des Vosges,	*id.*	6,78	0,678
Orme,	*id.*	10,40	1,040

(*a*) Dans la pratique, les pièces de bois ne peuvent être soumises à une traction permanente supérieure à 1/10 de celle de rupture; cette faible charge est due aux altérations auxquelles les bois sont sujets : ainsi l'expérience a appris que le bois de chêne, qui résiste cependant bien aux intempéries des saisons, ne peut être exposé plus de 25 à 30 ans à l'air libre, à la manière des pièces de ponts, sans être renouvelé.

DÉSIGNATION DES MATIÈRES.		VALEUR de R pour 1 millimètre carré de section.	EFFORT d'une grande sécurité en pratique pour 1 mil. q.
		kil.	kil.
Orme des Vosges, dans le sens des fibres		6,99	0,699
Hêtre,	*id.*	8,00	0,800
Teak,	*id.* employé aux constructions navales	11,00	1,100
Buis,	*id.*	14,00	1,400
Poirier,	*id.*	6,90	0,690
Acajou,	*id.*	5,60	0,560
Tremble des Vosges,	*id.*	7,20	0,720
Tremble, latéralement aux fibres (ou par glissement)		0,57	0,057
Sapin,	*id.* *id.*	0,42	0,042
Chêne, perpendiculairement aux fibres		1,60	0,160
Peuplier,	*id.*	1,25	0,125
Larix,	*id.*	0,94	0,094
Chêne ou sapin.	Pièces droites formées de morceaux assemblés par entailles en crémaillères	4,00	0,400
	Arcs en planches de champ ou en bois plié	3,00	0,300
2° MÉTAUX (*b*).			
Fer forgé ou étiré en barres	Le plus fort, de petit échantillon	60,00	10,00
	Le plus faible, de très gros échantillon	25,00	4,16
	Moyen	40,00	6,66
Fer ou tôle laminée	Tiré dans le sens du laminage (Navier)	41,00	7,00
	Tiré dans le sens perpendiculaire (*id.*)	36,00	6,00
Tôles fortes corroyées dans les deux sens		35,00	6,00
Fer dit *ruban*, très-doux		45,00	7,50
Fil de fer non recuit	De Laigle, employé à la carderie, de 0,23 de millimètre de diamètre	90,00	15,00
	Le plus fort, de 0,5 à 1,0 millim. de diamètre	80,00	13,33
	Le plus faible, d'un grand diamètre	50,00	8,33
	Moyen, de 1 à 3 millim. de diamètre	60,00	10,00
Fil de fer en faisceau ou câble (M. Bornet)		30,00	5,00
Chaînes en fer doux (*)	Ordinaires à maillons oblongs	24,00	4,00
	Renforcées par des étançons	32,00	5,33
Fonte de fer grise.	La plus forte, coulée verticalement	13,50	2,25
	La plus faible, coulée horizontalement	12,50	2,08
Acier	Fondu ou de cémentation, étiré au marteau et en petits échantillons (1re qualité)	100,00	16,67
	Le plus mauvais, en barres de très-gros échantillons, mal trempé	36,00	6,00
	Moyen	75,00	12,50
Bronze de canons, moyennement	16,00 à	23,00	3,83

(*b*) Dans la pratique, il convient que la charge permanente des fers ne dépasse dans aucun cas 1/3 de la charge de rupture, et qu'elle n'en soit que 1/4 ou 1/5 et même 1/6 quand les constructions sont de grande durée, et que l'on n'est pas suffisamment éclairé sur la qualité et l'homogénéité des fers. Pour la fonte, la charge permanente ne doit jamais dépasser 1/4 de la charge de rupture, et encore doit-on éviter son emploi dans les constructions exposées à des chocs.

Le rapport des charges permanentes aux charges de rupture pour les autres métaux est le même que pour le fer ou la fonte, suivant que leur état se rapproche plus de celui de l'un ou de l'autre de ces métaux.

(*) La section d'une chaîne est la somme des sections des deux côtés du maillon.

DÉSIGNATION DES MATIÈRES.		VALEUR de R pour 1 millimètre carré de section.	EFFORT d'une grande sécurité en pratique pour 1 mil. q.
		kil.	kil.
Cuivre rouge. . .	laminé, dans le sens de la longueur (Navier).	21,00	3,50
	laminé, de qualité supérieure (Trémery et Poirier Saint-Brice).	26,00	4,33
	battu (Rennie).	25,00	4,17
	fondu *id*.	13,40	2,33
Cuivre jaune ou laiton fin *id*.		12,60	2,10
Arcs ou pièces d'assemblage en fer forgé ou en fonte grise.		25,20	4,20
Cuivre rouge en fil, non recuit.	Le plus fort, de moins de 1 millimètre de diamètre.	70,00	11,67
	Moyen, de 1 à 2 millim. de diamètre.	50,00	8,33
	Id. le plus mauvais.	40,00	6,67
Cuivre jaune (laiton) en fil non recuit.	Le plus fort, de moins de 1 millimètre de diamètre (Dufour).	85,00	14,16
	Moyen, de plus de 1 millimètre de diamètre (Ardant et Dufour).	50,00	8,33
Fil de platine écroui, non recuit, de 0,127 de millimètre de diamètre (Beaudrimont).		116,00	19,33
Fil de platine recuit, d'après la mesure directe du diamètre		34,00	5,67
Étain fondu (Rennie).		3,00	0,50
Zinc fondu.		6,00	1,00
Zinc laminé.		5,00	0,833
Plomb fondu (Rennie).		1,28	0,213
Plomb laminé (Navier).		1,35	0,225
Fil de plomb de coupelle, fondu, puis passé à la filière, ayant 4 millimètres de diamètre (Ardant).		1,36	0,227
3° CORDES (*c*).			
Aussières et grelins en chanvre de Strasbourg, de 13 à 14 millimètres de diamètre (69).		8,80	4,40
Aussières et grelins en chanvre de Lorraine, de 13 à 17 millimètres.		6,50	3,25
Aussières et grelins en chanvre de Lorraine ou de Strasbourg, de 23 millimètres.		6.00	3,00
Aussières et grelins de Strasbourg, de 40 à 54 millimètres.		5,50	2,75
Cordages goudronnés.		4,40	2,20
Vieille corde, de 23 millimètres.		4,20	2,10
Courroie en cuir noir (68).		»	0,20
4° MATIÈRES DIVERSES (*d*).			
Verre et cristal, en tubes ou en tiges pleines.		2,48	0,248
Basalte d'Auvergne.		0 770	0,077
Calcaire.	de Portland.	0.600	0,060
	blanc d'un grain fin et homogène. . .	0,144	0,0144
	à tissu compacte (lithographique). . .	0,308	0,0308

(*c*) Pour les cordes, la charge permanente peut être la moitié de la charge de rupture. La rupture est précédée d'un allongement qui est de 1/6 de la longueur primitive; cet allongement est réduit à 1/10 si l'effort n'est que moitié de la charge maxima.

D'après Coulomb, la résistance d'une corde goudronnée n'est que les 2/3 ou les 3/4 de celle d'une corde blanche d'un même nombre de fils de caret, et, d'après Duhamel, la résistance d'une corde blanche mouillée n'est que 1/3 de la même corde sèche. Cette dernière résistance s'élève ordinairement à la moitié de celle de la corde sèche.

(*d*) Ces matières ne sont employées qu'accidentellement pour résister à l'extension; la charge permanente qu'il convient de leur faire supporter est de 1/10 de la charge de rupture.

DÉSIGNATION DES MATIÈRES.		VALEUR de R pour 1 millimètre carré de section.	EFFORT d'une grande sécurité en pratique pour 1 mil. q.
		kil.	kil.
Calcaire (*suite*).	à tissu arénacé (sablonneux).	0,229	0,0229
	à tissu oolithique (globuleux).	0,137	0,0137
Roche de Bagneux, près Paris.		0,151	0,0151
Pierre tendre, dite *vergelet*.		0,073	0,0073
Briques.	de Provence, très bien cuites et d'un grain très uni.	0,195	0,0195
	ordinaires, faibles.	0,080	0,0080
	de Bourgogne, très dures.	0,207	0,0207
	de Paris, bien cuites.	0,119	0,0119
Plâtre.	gâché ferme.	0,117	0,0117
	id. moins ferme que le précédent.	0,058	0,0058
	id. fabriqué à la manière ordinaire.	0,040	0,0040
	au panier, gâché très serré.	0,098	0,0098
	au sas, gâché moins serré que le précédent.	0,070	0,0070
	au panier, gâché pour enduits (pas trop serré).	0,049	0,0049
Mortier.	en chaux hydraulique des buttes Chaumont, près Paris, un an après son emploi.	0,071	0,0071
	en chaux grasse et sable, âgé de 14 ans.	0,042	0,0042
	en chaux grasse, mauvais.	0,0075	0,00075
	en chaux hydraulique ordinaire et sable.	0,0900	0,0090
	en chaux éminemment hydraulique.	0,1500	0,0150
	en ciment de Pouilly et sable (parties égales), après un an de durcissement dans l'air ou dans l'eau.	0,096	0,0096
	en ciment de Vassy et sable (parties égales), après six mois de durcissement à l'air.	0,0962	0,00962
	en ciment de Vassy et sable (parties égales), après un an de durcissement dans l'eau, aux enduits des radiers des égouts de Paris.	0,151	0,0151
	en ciment de Vassy (pur), après un an de durcissement dans un massif de fondation humide.	0,207	0,0207
	en ciment de Vassy (pur), après un mois de durcissement dans l'eau de mer.	0,113	0,0113
	en ciment de Vassy et sable (parties égales), après un mois de durcissement dans l'eau de mer.	0,085	0,0085

365. Câbles en chanvre (73). On admet généralement que la résistance de ces câbles à la rupture est de $5^k,10$ par millimètre carré de section, et que dans la plupart des applications on peut les faire travailler sans danger jusqu'au cinquième de cette charge de rupture. Ainsi, P étant la charge du câble et d son diamètre en millimètres, on doit avoir :

$$\frac{\pi d^2}{4} \times 1,02 = P, \quad \text{d'où} \quad d = 1,13 \sqrt{P}.$$

Dans les locaux secs, les câbles en chanvre peuvent durer plusieurs années, tandis qu'exposés à l'humidité ils se détériorent très rapidement. Dans les puits de mines, ils résistent rarement plus de 4 à 6 mois. Comme cette usure rapide augmente notablement les frais, et expose à des dangers, dans la plupart des mines on substitue les câbles métalliques aux câbles en chanvre (69 à 71).

366. Chaînes. Pour calculer le diamètre du fer dont est formée une chaîne, on pose :

$$\pi r^2 = \frac{P}{p}, \quad \text{d'où} \quad r = \sqrt{\frac{P}{\pi p}}.$$

r rayon, en millimètres, de la section transversale du fer formant les maillons ;
P charge que supporte chaque côté du maillon, ou 2P charge totale de la chaîne ;
p charge maximum dont on veut charger la chaîne, par millimètre carré de section.

Pour $P = 2500$ kilogr., supposant que $p = 4$ kilogr., valeur donnée au tableau précédent pour les chaînes ordinaires sans étançons, la formule ci-dessus donne :

$$r = \sqrt{\frac{2500}{3,1416 \times 4}} = 14^{mm},10;$$

ce qui fait $28^{mm},2$ pour le diamètre du fer.

Pour les chaînes sans étançons, quand r est les 0,4 du rayon de l'arc suivant lequel est courbée la fibre moyenne aux extrémités du maillon, et que, comme cela a lieu ordinairement, la longueur totale du maillon est égale à $10r$, de manière à avoir un vide central égal à $2r$ quand la chaînée est formée, M. Résal a établi théoriquement que l'on devait faire :

$$r = 1,73 \sqrt{\frac{P}{\pi p'}}.$$

p' charge qu'on peut faire supporter, par millimètre carré de section, au fer dont est formée la chaîne, quand ce fer est tiré directement dans le sens de sa longueur.

Pour $P = 2500$ kilog., faisant $p = 10$ kilog., valeur qui convient, comme l'indique le tableau précédent, au fer de petit échantillon forgé ou étiré en barres, la formule de M. Résal donne :

$$r = 1,73 \sqrt{\frac{2500}{3,1416 \times 10}} = 15^{mm},44.$$

Le diamètre étant $30^{mm},9$, la section est 750 millimètres carrés, et la charge par millimètre carré $\frac{2500}{750} = 3^k,33$. Les hypothèses de M. Résal conduisent, comme on le voit, à une charge un peu moindre que celle de 4 kilog. qu'on adopte ordinairement.

En général, des chaînes à maillons oblongs fabriquées avec du fer résistant à 32 kilog. par millimètre carré de section se rompent à 24 kilog. ; cette charge de rupture s'élève à 30 kilog. par millimètre carré, si les maillons sont étançonnés.

Dans la marine, on soumet les chaînes étançonnées de $0^m,016$ de

diamètre et au-dessus, à une traction d'épreuve de 17 kilogr. par millimètre carré de la double section. Cette traction d'épreuve est de 14 kilog. pour les chaînes dont le fer a moins de $0^m,016$ de diamètre, ces chaînes n'étant pas étançonnées.

Le poids d'une chaîne est sensiblement égal à 4 fois celui d'une tige de fer de même longueur, dont le diamètre est égal à celui du fer de la chaîne.

367. Chaînes de Galle. Dans ces chaînes, dont les chaînons sont composés de plaquettes de tôle réunies entre elles par des boulons servant d'axes d'articulation, il y a toujours dans deux chaînons voisins n plaques dans l'un et $n+1$ dans l'autre.

Les proportions adoptées dans la pratique sont à peu près les suivantes :

$$l = 3d, \quad E = 4d, \quad (2n+1)e = 6d.$$

d diamètre des boulons;
l largeur des plaques composant les chaînons;
e épaisseur des plaques;
E écartement d'axe en axe des boulons;
$(2n+1)\,e$ épaisseur totale de la chaîne.

La section de la chaîne qui fatigue le plus est celle qui correspond aux boulons dans les chaînons de n plaques. Pour cette section, la résistance totale P est, en désignant par R la résistance de la tôle par unité de section, donnée par le produit :

$$P = (l - d)\,enR.$$

Le boulon étant cisaillé en $2n$ points, sa résistance totale, qui doit être égale à la précédente, est, en prenant $0,8R$ pour la résistance au cisaillement par unité de section du boulon :

$$P = \frac{\pi d^2}{4} \times 2n \times 0,8\,R.$$

Une application remarquable à signaler de la chaîne de Galle est celle qui a été faite dans les accessoires de l'un des ascenseurs de la tour Eiffel (à Paris) du système à pistons articulés de MM. *Roux*, *Combaluzier* et *Lepape*. Les chaînons, au nombre de 8, sont formés de barres d'acier de $0^m,008$ d'épaisseur, de $0^m,108$ de hauteur et d'une longueur de $0^m,238$ ayant une partie rectangulaire de $0^m,130$ de longueur, laquelle est terminée par deux demi-circonférences de $0^m,108$ de diamètre. Les boulons d'articulation en acier de $0^m,044$ de diamètre sont espacés de $0^m,130$ d'axe en axe. Ces chaînes, qui ont une longueur de 28 mètres entre les articulations extrêmes, donnent le mouvement à des pignons en acier de $0^m,652$ de diamètre extérieur. Il y a 16 maillons traversés par chacun de ces boulons.

368. Fers en barre, fil de fer et acier fondu. *Des expériences faites à Guérigny, par M. Bornet*, sur une barre de fer à câble de $0^m,0495$ de diamètre et de $6^m,42$ de longueur, et d'autres faites par Ardant sur des

fils de fer doux ou recuits et sur des fils durs ou non recuits, ont donné les résultats du tableau suivant :

FER A CABLE, DUCTILE.		FIL DE FER.		
Charge par millimètre carré.	Allongement par mètre courant	Charge par millimètre carré.	Allongement par mètre courant.	
			Fer doux recuit.	Fer dur non recuit
kil.	millim.	kil.	millim.	millim.
2	0,08	5	0,294	0,260
4	0,16	10	0,588	0,520
6	0,31	12	0,882	0,780
8	0,36	15	1,176	1,040
10	0,47	20	1,470	1,300
12	0,58	25	2,500	1,569
14	0,69	30	13,000	»
16	0,86	32,5	14,100	2,[illegible]20
18	2,20	35,0	18,000	2,400
20	15,76	40,0	20,500	»
22	24,34	42,5	Rupture.	2,820
24	34,97	45,0	»	3,100
26	46,96	49,0	»	Rupture.
28	67,70	50,0	»	»
30	89,39			
32	132,48			
	Rupture.			

Ce tableau montre que jusqu'à une certaine limite, qu'on peut considérer comme la limite d'élasticité, l'allongement reste à peu près proportionnel à la charge, mais, qu'au delà, l'allongement augmente dans un rapport beaucoup plus grand que la charge. Il faut voir aussi quelle influence a le recuit sur la limite d'élasticité et la résistance à la rupture (p. 421).

Des expériences faites par Eaton Hodgkinson, sur les barres de fer de première qualité et de 0m,01313 de diamètre, assemblées bout à bout par des manchons, de manière à former un ensemble de 15 mètres de longueur, il résulte :

1° Que sous les charges inférieures à celle qui correspond à la limite d'élasticité, il y a un allongement permanent ;

2° Que, jusqu'à la charge de 15 kilogr. par millimètre carré, les allongements totaux croissent à peu près proportionnellement aux charges, et qu'il en est de même des allongements permanents, mais sans que ces derniers s'élèvent au plus à la valeur, négligeable dans la pratique, d'un centième de millimètre par mètre, sous la charge de 15 kilogr. ;

La faible valeur des allongements permanents, qui n'augmentent plus quand, après une première expérience, on en fait d'autres successives sur le même assemblage de tiges, permet de supposer qu'ils proviennent de tassements des points d'appui et des assemblages de tiges ; c'est ce que confirment les expériences suivantes faites au Conservatoire ;

3° Au delà de la charge de 15 kilogr., et surtout à partir de celle de 18k,74 par millimètre carré, les allongements, et surtout les allongements permanents, croissent très rapidement et dans un rapport plus grand que les charges ;

4° La valeur moyenne du module d'élasticité E a été de 19359,458500 (*rapportée au millimètre carré*).

Expériences de Vicat sur l'allongement progressif des fils de fer. (*Annales des ponts et chaussées*, 1831.)

Fil de fer non recuit du n° 17. Diamètre 0m,002681, résistance à la rupture par millimètre carré 73k,33, coefficient d'élasticité E = 20105.
Fil de fer non recuit du n° 18. Diamètre 0m,003087, résistance à la rupture par millimètre carré 82k,437, coefficient d'élasticité E = 19935 (*rapporté au millim. carré*).
Fil de fer exactement recuit du n° 19. Coefficient d'élasticité E = 14549.

Expériences de Leblanc sur les fils de fer employés au pont suspendu de la Roche-Bernard.

Diamètre	0m,031,	résistance à la rupture par millimètre carré de section	82k,77
Id.	0 ,032,	*id.*	77 ,38
Id.	0,03309	*id.*	77 ,90

Expériences faites au Conservatoire des arts et métiers, par le général Morin.

1° *Fils de cuivre recuits* de 0m,0026 de diamètre. On a opéré sur des longueurs de fils de 21 mètres et d'un seul bout, dressés à l'aide d'un maillet en bois pour en faire disparaître les ondulations, appelées *cosses*.

Les allongements permanents observés ont varié de $\frac{1}{29585}$ à $\frac{1}{285715}$ de la longueur primitive, quantité que, d'après Morin, il est permis de considérer comme nulle, en ayant égard au redressement des cosses du fil par suite du chargement, et à l'influence des moindres variations de la température. (D'après de Laplace et Lavoisier, une variation de température de 1° fait varier la longueur du fil de $\frac{1}{58400}$).

La valeur moyenne du coefficient d'élasticité a été E = 7338,740405, valeur inférieure à celles du tableau page 412. La densité des fils qui ont donné ce résultat n'était que de 5,36 et 5,54, au lieu que celle des fils anciennement essayés était de 8,54 ; ce qui indique des fils d'une nature différente.

2° *Un fil de fer de* 0m,0016 *de diamètre* expérimenté dans les mêmes conditions que les fils de cuivre précédents, a donné un allongment permanent observé de $\frac{1}{29762}$ à $\frac{1}{277777}$ de la longueur primitive. Le coefficient d'élasticité a été en moyenne E = 19643,468585 (*rapporté au millim. carré*).

3° *Un fil de fer recuit* de 0m,002066 de diamètre a donné $\frac{1}{178000}$ pour l'allongement permanent et E = 15762,925545.

4° *Barre d'acier fondu* de MM. Jackson, Pétin et Gaudet, de 0m,010 de côté : E = 22115,211723 en moyenne.

Résistance des fers en barre à la rupture.

1° *Expériences de M. Bornet sur des fers laminés carrés ou ronds, pour câbles de la marine* (*Annales des ponts et chaussées*, 1834).

	Résistance en kilog. par mm. q.
Fers carrés anglais de qualité supérieure, de 0m,0255 à 0m,0388 de côté . .	37,09
Fers ronds anglais (*best cables Crawshay*), de 0m,0255 à 0m,039 de diamètre	35,35
Fers ronds à câbles de Fourchambault, de 0m,0333 à 0m,057 de diamètre . .	31,62
Fers à câbles de Rigny (Berri), affinés au charbon de bois, corroyés au marteau, étirés au laminoir, et de 0m,0335 sur 0m,033 à 0m,04275 sur 0m,04175 de côté.	34,08

	Résistance en kilog. par mm. q.
Fers ronds à câbles du Creusot, de $0^m,0555$ à $0^m,066$ de diamètre	35,67
Fer rond marchand du Creusot, de $0^m,0375$ de diamètre	35,08
Fer rond à câbles de Saint-Chamond (Loire), de $0^m,045$ de diamètre	36,15
Fer rond provenant du corroyage de rognures de barres de fer à câbles, fait au laminoir de Guérigny, de $0^m,045$ de diamètre	32,07
Fer provenant de l'étirage et corroyage de paquets de rognures de tôle, fait au laminoir de Guérigny, de $0^m,031\,33$ de diamètre	31,78

2° *Expériences faites chez Gouin et Cᵉ.*

Cornières d'Hayange de $0^m,06$ sur $0^m,06$	38,90
Cornières d'Ars-sur-Moselle de $0^m,10$ sur $0^m,10$	32,27
Fers à T d'Ars-sur-Moselle	37,31
Fers plats d'Hayange	36,09
Fers plats d'Ars-sur-Moselle	36,92

3° *Expériences de M. Pronnier, ingénieur, sur des fers et aciers employés à la confection des bandages.*

Bandages	en fer de Belgique (fer au coke)	32,00
	en acier puddlé (fer au coke)	44,00
	en fer français (fonte au bois, puddlé)	44,00
	en acier puddlé (fonte à la houille)	65,00

4° *Expériences de Flachat et Pétiet sur les fers feuillards d'Abainville.*

Fers ordinaires	de 32 à 33,00
Fers corroyés	36,00

(Voir plus loin : FONDERIES, MÉTALLURGIE, 2ᵉ partie.)

369. Expériences sur la fonte. E. Hodgkinson a aussi fait des expériences sur des fontes de quatre localités anglaises. Les barres avaient 645 millimètres carrés de section et $3^m,05$ de longueur, et étaient assemblées bout à bout pour obtenir des longueurs de $15^m,25$. De ces expériences il résulte :

1° Que jusqu'à la charge d'environ 6 kilogrammes par millimètre carré, charge bien supérieure à celle qu'on atteint dans la pratique, les allongements totaux et les *allongements élastiques* (différence entre les allongements totaux et les allongements permanents) sont sensiblement proportionnels aux charges, mais cependant avec un peu plus d'écart que pour le fer ;

2° Entre la charge $0^k,74$ par millimètre carré de section et celle de $5^k,92$ correspondant à un allongement de $0^m,000\,715$ par mètre ou de $\frac{1}{1400}$, la valeur moyenne du module d'élasticité est $E = 9\,096,070\,000$, valeur qui diffère de 1/12 environ de la plus forte et de la plus faible.

Des expériences faites par Hodgkinson ont fait connaître que la résistance de la fonte à la rupture est la même, que les hauts fourneaux soient soufflés à l'air chaud ou à l'air froid. Cette résistance a été en moyenne de $11^k,234$ par millimètre carré de section. En 1815, Minard et Desormes avaient trouvé $11^k,325$. Les expériences ont donné depuis $16^k,64$ pour la résistance moyenne des fontes françaises.

La difficulté d'obtenir des pièces épaisses de fonte bien pleines et bien saines à l'intérieur fait que, dans les presses hydrauliques puissantes, la fonte travaille parfois sous des charges très rapprochées de celle de rupture (328).

Résistance des fontes à la rupture par millimètre carré de section (Love, *Résistance des matériaux*).

1° *Fontes de 1re fusion.*

		Moyenne.
Des Landes et de la Gironde	de 11k,05 à 13k,50	12k,80
De la Gironde	de 11 ,13 à 13 ,94	13 ,42
De Buglose (Landes)	de 14 ,90 à 15 ,91	15 ,55
De Beaulac (Gironde)	de 13 ,92 à 14 ,98	14 ,24
De Mazières (Cher)	de 13 ,74 à 15 ,12	14 ,46
De Torteron (Nièvre)	de 16 ,60 à 25 ,74	20 ,80
Id.	de 13 ,98 à 14 ,84	14 ,41
De Montluçon	de 17 ,80 à 19 ,68	18 ,56
De Commentry	de 14 ,21 à 14 ,71	14 ,46

2° *Fontes de 2e fusion.*

De Bessèges (Gard)	de 14 ,53 à 22 ,34	18 ,00
De la fonderie de E. Gouin et Ce	de 14 ,25 à 16 ,62	15 ,40

370. Expériences sur la résistance du bronze. Résistance à la rupture par millimètre carré de section de l'ancien bronze à canon composé de : *cuivre* 89,96, *étain* 9,79, *plomb* 0,25 (expériences faites à Douai en 1858).

Bronze neuf	16k,64
Bronze refondu	21 ,09
Bronze tiré d'une pièce de 24 (expériences faites au Conservatoire)	10 ,23

D'après ces résultats, Morin a adopté :

Pour le bronze en petits lingots	21 ,00
Pour le bronze des canons de petits calibres	16 ,00
Pour le bronze des canons de gros calibres	10 ,00

371. Expériences sur les tôles. M. Edwin Clark rapporte que des expériences faites sur des tôles pour chaudières ont donné en moyenne une résistance à la rupture par traction de 30k,89 par millimètre carré de section. Les épaisseurs de tôle ont varié de 0m,0127 à 0m,0175, et, quoique de provenances diverses, les résistances n'ont pas varié sensiblement.

Des expériences faites pour déterminer l'influence du sens du laminage sur la résistance de la tôle ont donné en moyenne 31k,48 et 28k,48, suivant que la tôle est tirée parallèlement ou normalement au sens du laminage.

D'autres expériences faites dans le même but par Fairbairn, ingénieur de Manchester, ont donné 34k,46 et 35k,25 pour ces résistances moyennes : c'est sensiblement la même valeur.

Enfin des expériences faites dans les ateliers de Gouin et Ce, sur des tôles d'Imphy, de Montataire, de Commentry et d'Hayange, ont donné une moyenne de 34k,43 et 31k,76 pour ces résistances.

Expériences comparatives exécutées sous la direction de Combes, Gorieux et C. Couche, sur de la tôle d'acier fondu de 0ᵐ,006 d'épaisseur, propre à la fabrication des chaudières à vapeur, sur des tôles en fer fabriquées au coke, et sur des tôles d'Audincourt fabriquées au charbon de bois.

Pour la tôle d'acier, la résistance a été la même dans le sens du laminage qu'en travers, et de 65ᵏ,50 par millimètre carré pour de la tôle prise dans la partie d'une chaudière qui avait été soumise à l'action du feu, et de 70 kilog. pour de la tôle prise en dessus de la chaudière.

La tôle de fer au coke a donné 32 kilog. pour la résistance en longueur et 35 kilog. pour la résistance en travers. La tôle de fer au bois a donné respectivement 35ᵏ,50 et 37 kilog. pour ces résistances.

372. **Expériences sur les boulons, rivets et tôles rivées.** Les rivets qui réunissent les plaques de tôle, les boulons d'assemblage des chaînes plates, ceux des poulies, des moufles, etc., résistent à un effort transversal ou de *cisaillement.*

Suivant que les boulons ou rivets réunissent 2, 3, 4... n plaques, comme dans les moufles, par exemple, il y a respectivement 1, 2, 3... $n-1$ points de cisaillement, et l'expérience prouve que la résistance est proportionnelle à ces nombres de points, et que cette résistance est sensiblement la même que si chaque section cisaillée résistait à un effort de traction longitudinal. En effet, des expériences ont donné une résistance moyenne au cisaillement de 36ᵏ,69 par millimètre carré, et la résistance du fer à l'extension a été trouvée de 36 à 40 kilog.

La commission qui a fait les expériences comparatives précédentes sur les tôles, a également constaté la résistance des rivets en acier fondu au cisaillement. Un tel rivet de 0ᵐ,016 de diamètre n'a commencé à se cisailler, mais sans se rompre, que sous une charge de 11 000 kilog.; c'est 55 kilog. par millimètre carré de section, résistance qui n'est inférieure à celle par extension que de 1/6 au plus.

Des expériences faites par Fairbairn ont donné, selon que deux feuilles de tôle sont réunies par un simple rang de rivets ou par deux rangs dont les rivets de l'un se croisent avec ceux de l'autre, une résistance moyenne à la rupture de 29ᵏ,67 et 38ᵏ,33 par millimètre carré de la section de la tôle faite par les axes des trous; cette dernière résistance est très sensiblement celle de la tôle.

Quelques expériences citées par E. Clark tendent à faire estimer de 5000 à 6000 kilog. le frottement produit par un seul rivet bien fait, remplissant bien son trou de 21 à 22 millimètres de diamètre; ce qui l'a conduit à conclure que les solides formés par des tôles ainsi assemblées résistaient comme s'ils étaient d'une seule pièce. Cette estimation paraît un peu exagérée; mais elle peut être admise dans la pratique, vu la faible charge qu'on y fait supporter à la tôle, sauf à diminuer un peu le coefficient de résistance de la tôle. Beaucoup d'ingénieurs ne font aucune diminution.

Gouin et Cᵉ ont fait tourner des broches en fer corroyé, dit extra-martelé de Grenelle, et en ont réuni deux tiges en acier trempé, dont

l'une embrassait l'œil de l'autre par une fourchette bien assemblée; ces tringles, soumises à des efforts de traction, ont donné les résultats suivants :

Diamètres des broches en millimètres.	8	10	12	16
Résistance moyenne des broches par millim. carré.	32k,70	31k,55	31k,48	31k,83

Le même fer que les broches, tiré longitudinalement, ne s'est rompu que sous une charge de 40 kilog. par millimètre carré. Ainsi l'on peut admettre que la résistance au cisaillement est les 0,8 de la résistance à la traction.

En rivant à chaud des broches qui ont donné 31k,83, le même appareil a fourni 32k,55 pour cette résistance. La faible différence de ces nombres ne serait-elle pas due à ce que les deux branches de la fourchette ne se rapprochaient pas facilement et étaient dans un certain état de poli?

373. *Résistance des boulons et rivets qui réunissent des plaques de tôle à la manière de ceux des boites à feu des chaudières de locomotives*, d'après les expériences de Fairbairn. Pour la tôle de fer l'épaisseur était de 0m,0127, et pour la tôle de cuivre 0m,0095. Les boulons étaient seulement vissés, ou à la fois vissés et rivés.

NATURE des boulons.	NATURE de la tôle.	RÉSISTANCE par millimètre carré.	MODE d'assemblage.	MODE DE RUPTURE.
Fer.	Fer.	kil. 43,67	Vissés et rivés.	Le boulon a été rompu au milieu, sa tête et la plaque restant intactes.
Fer.	Cuivre.	29,60	Vissés.	Les filets de la tôle de cuivre ont été arrachés.
Fer.	Cuivre.	37,15	Vissés et rivés.	La tête du rivet a été forcée et le boulon arraché à travers la tôle de cuivre.

374. Calcul des boulons. Formule (voir le n° 430). Le profil des filets de vis des boulons est un triangle équilatéral à angles arrondis. d étant le diamètre de la tige d'un boulon, le diamètre le plus fatigué de la partie filetée est :

$$d' = 0,8d.$$

P étant la tension que doit supporter un boulon, et R la résistance par millimètre carré, résistance qu'il est bon de ne pas faire supérieure à 6 kilog. pour le fer, on a :

$$P = \frac{\pi d'^2}{4} R = \frac{0,64\pi d^2}{4} R = 0,16\pi R d^2,$$

d'où :

$$d = \sqrt{\frac{1}{0,16\pi R}} \sqrt{P} = K\sqrt{P}.$$

Tableau des valeurs du coefficient $K = \sqrt{\frac{1}{0{,}16\pi R}}$ *adoptées dans beaucoup d'ateliers :*

Boulons	pour bâtiments,	dont le fer est de qualité ordinaire	0,7
—	pour machines,	en fer de bonne qualité	0,6
—	—	en acier corroyé	0,5
—	—	en acier cémenté	0,45
—	—	en acier fondu et trempé	0,4

Du cours de résistance appliquée, professé à l'École centrale par M. Contamin, nous extrayons ce qui suit sur les boulons :

Pour les boulons de bâtiments, R ne doit pas dépasser 3^k par millimètre carré et cette valeur donne $K = 0{,}813$;

Pour les boulons de machines, en fer de qualité ordinaire, on peut prendre $R = 4^k$, d'où $K = 0{,}705$;

Enfin, pour les boulons de machines, en fer de très bonne qualité, on peut prendre $R = 6^k$, d'où $K = 0{,}575$.

Ces trois dernières valeurs de K trouvent leur justification dans celles ci-dessus, adoptées dans beaucoup d'ateliers.

Appelant h la hauteur de l'écrou et n le nombre des filets sur cette hauteur, on a pour :

$R = 3^k$, cas des boulons pour bâtiments . . . . $h = 1{,}023d$ et $n = 8{,}88$;
$R = 4$, cas des boulons ordinaires pour machines . . . . $h = 1{,}364d$ et $n = 11{,}84$;
$R = 6$, cas des boulons supérieurs pour machines . . . . $h = 2{,}046d$ et $n = 17{,}16$.

Que la tête du boulon soit fabriquée par enroulement ou par refoulement, sa hauteur h' doit être telle que la force qui tend à faire glisser par arrachement le corps du boulon dans la tête ne dépasse pas 1 kilog. par millimètre carré, soit $\pi dh' \times 1$ pour toute la surface. On doit donc avoir au maximum :

$$\frac{0{,}64\pi d^2}{4} R = \pi dh', \qquad \text{d'où} \qquad h' = 0{,}16Rd.$$

Soit, au minimum :

$$h' = 0{,}64d \quad \text{si} \quad R = 4 \text{ kil.}, \quad \text{et } h' = 0{,}96d \quad \text{si} \quad R = 6 \text{ kil.}$$

On admet généralement 0,12 pour la valeur du coefficient du frottement entre les filets de l'écrou et ceux du boulon, ainsi que pour le coefficient du frottement de l'écrou sur sa portée, qui doit être tournée. Pour que le graissage soit possible, entre les filets, la pression normale ne doit pas dépasser $0^k{,}6$ par millimètre carré de leur surface de contact travaillante.

Généralement les faces supérieure et inférieure des écrous sont arrondies aux angles, de manière que la portée soit limitée à l'extérieur par la circonférence inscrite à l'hexagone ou au carré suivant lesquels l'écrou se projette, et à l'intérieur par la circonférence du trou du boulon. Du côté de la tête, ce trou, à cause du léger congé qui

s'y trouve, a un diamètre égal à 1,1 *d*, et du côté de la tête du diamètre ne doit pas dépasser 1,05 *d*.

Pour les boulons de bâtiments, soit pour $R = 3^k$, on a (en millim.) :

Cas de l'écrou à 6 pans.	Diamètre du cercle circonscrit à l'hexagone . . .	2,388*d*
	Côté de l'hexagone.	1,194*d*
	Diamètre du cercle inscrit à l'hexagone	2,068*d*
Cas de l'écrou à 4 pans.	Diamètre du cercle circonscrit au carré	2,926*d*
	Côté du carré.	2,068*d*
	Diamètre du cercle inscrit au carré.	2,068*d*

Les boulons pour machines sont toujours à six pans. Pour $R = 4^k$, on a :

Diamètre du cercle circonscrit à l'hexagone.	2,665*d*
Côté de l'hexagone.	1,332*d*
Diamètre du cercle inscrit à l'hexagone..	2,307*d*

L'écrou est manœuvré à l'aide d'une clef sollicitée par un homme produisant un effort $F = 15^k$, ou par deux hommes donnant $F = 30^k$. δ étant le bras du levier de F, le moment de cette force est $F\delta$, et l'on a :

$$F\delta = 0{,}1795\,Pd.$$

Tableau des dimensions des boulons de machines et de leurs accessoires, dans l'hypothèse $R = 4^k$. *L'écrou est à six pans et le millimètre est pris pour unité.*

EFFORT d'extension P	DIAMÈTRE du corps du boulon $d = 0{,}705\sqrt{P}$	HAUTEUR de l'écrou $h = 1{,}36d$	DIAMÈTRE extérieur de l'écrou $2{,}665d$	MOMENT $F\delta = 0{,}1795Pd$	BRAS de levier δ
kilog.	millim.	millim.	millim.		mèt.
					Pour $F = 15^k$
100	7,0	9,5	18,6		
200	9,8	13,5	26,1	0,356	0,023
300	12,1	16,3	32,2		
400	14,1	19,1	37,5		
500	15,6	21,2	41,5	1,404	0,093
600	17,1	23,2	45,5		
700	18,5	25,1	49,3		
800	19,8	27,1	52,7	2,851	0,190
900	21,0	28,5	55,9		
1000	22,1	30,0	58,8	3,978	0,265
1100	23,2	31,5	61,8		
1200	24,2	32,9	64,4	5,220	0,348
1300	25,2	34,2	67,1		
1400	26,2	35,6	69,8	6,602	0,440
1500	27,1	36,8	72,2		
1600	28,2	38,3	75,1	8,100	0,540
1700	28,8	39,1	76,7		
1800	29,7	40,3	79,1	9,540	0,636
1900	30,5	41,4	81,2		
2000	31,3	42,5	83,4	11,270	0,751
2100	32,1	43,6	85,5		
2200	32,8	44,6	87,4		Pour $F = 30^k$
2300	33,5	45,5	89,2		
2400	34,3	46,6	91,4	14,730	0,490
2500	35,2	47,8	93,8		

Les dimensions du tableau précédent diffèrent d'une manière sensible de celles du n° 430, déduites par Armengaud de lois empiriques reproduisant approximativement les dimensions des différents types de boulons du constructeur anglais Whitworth. Or, dans les boulons calculés d'après la formule établie selon ce constructeur, la plus grande tension des fibres ne dépassant pas $1^k,3$ par millimètre carré, et la même formule appliquée au profil de filets pour lequel le diamètre du noyau intérieur aux filets est $d' = 0,8d$ donnant $R = 1^k,6129$, cette fatigue est évidemment en dehors de toute proportion avec l'effort de sécurité auquel on peut soumettre la matière composant les boulons, et cela d'autant plus que les fers de ces pièces ont une résistance supérieure à celle des fers composant les tôles et cornières, que l'on ne craint pas de soumettre à des efforts d'extension de 5 à 6 kilog. par millimètre carré.

Le nombre des boulons entrant dans une construction étant très considérable, il est important de n'en pas exagérer les dimensions, ce qui serait coûteux, et d'un autre côté de ne pas les faire trop faibles, ce qui serait dangereux.

375. Calcul des rivets. La rivure se fait ordinairement conique à l'aide d'un petit marteau, ou en goutte de suif à l'aide d'une *bouterolle;* la tête du rivet repose sur un *turc* dans les deux cas.

Le diamètre de la tige du rivet étant représenté par 100, la tête est un segment sphérique à une base, dont la hauteur est 66 et le diamètre de la base 167, le rayon de la sphère étant 86. Pour que la rivure soit égale à la tête, la tige du rivet doit faire une saillie de 111,5 sur la face de la tôle. On doit observer ces proportions quand on fait usage de la bouterolle, parce qu'il ne faut pas d'excès de fer.

La rivure se fait à chaud, et l'on ne doit pas discontinuer de frapper tant que l'excès de la température du rivet sur celle de la tôle n'est pas inférieure à 250 degrés; sans quoi la contraction peut briser le rivet. Dans les conditions de la pratique, 'excès de température est d'environ 150 degrés; la contraction produit théoriquement sur le rivet une traction de $23^k,4$ par millimètre carré de section, ce qui est loin de la traction de rupture, et en supposant le coefficient de frottement égal à 0,6, le frottement entre les pièces réunies produit par un rivet est de $14^k,4$ par millimètre carré de la section du rivet. Des expériences faites en Angleterre ont donné 13 à 16 kilog. pour le frottement ou adhérence produit par millimètre de section des rivets. Ces expériences ont été faites en rivant ensemble trois feuilles de tôle, et en faisant, après le refroidissement, glisser celle du milieu, dont le trou avait été allongé à l'avance, ce qui sort des conditions de la rivure ordinaire. La moitié de la résistance totale trouvée est l'adhérence produite par le rivet dans chaque joint de contact.

Diamètre et nombre des rivets. Pour les chaudières à vapeur, afin d'éviter toute fuite et pour obtenir en même temps une résistance suffisante, on fait dans la pratique :

$$d = 2e + 0^m,003 \quad \text{et} \quad E = 3d.$$

d diamètre des rivets;
e épaisseur de la tôle, en millimètres.
E distance d'axe en axe des rivets.

Dans le cas des charpentes en tôle, le nombre et le diamètre des rivets n'est plus qu'une question de résistance. L'adhérence produite entre les tôles étant de 14 à 16 kilog. par millimètre carré de section des rivets, comme on peut compter utilement sur environ 1/4 de cette force, c'est-à-dire sur $3^k,5$ à 4 kilog., on a, en faisant travailler la tôle à 7 kilog. par millimètre carré de section :

$$7el = 3{,}5 \frac{\pi d^2}{4} n. \qquad (a)$$

l largeur de la tôle, en millimètres ;
n nombre de rivets.

Faisant $d = 2e$, valeur ordinairement adoptée dans la pratique, l'équation précédente devient :

$$7el = 3{,}5 \frac{\pi \times 4e^2}{4} n, \qquad \text{d'où} \qquad n = \frac{2l}{\pi e}.$$

Dans les semelles de poutres en tôle, il y a généralement plusieurs feuilles de tôle superposées; il faut tenir compte du nombre des feuilles interrompues. m étant ce nombre, la section résistante de la tôle est elm, et la relation (a) devient :

$$7elm = 3{,}5 \frac{\pi d^2}{4} n ;$$

d'où, en faisant encore $d = 2e$:

$$n = \frac{2lm}{\pi e}.$$

Pour les plates-bandes et les cornières dont l'épaisseur est comprise entre $0^m,009$ et $0^m,012$, l'expérience apprend que si la distance entre deux rivets consécutifs dépasse $0^m,100$, il est difficile d'empêcher les surfaces en contact de bâiller; d'où la règle souvent suivie d'adopter pour écartement maximum entre les rivets la distance $0^m,100$.

Généralement, le diamètre des rivets réunissant les cornières à l'âme est égal à celui d des rivets réunissant les cornières aux plates-bandes, et le double du nombre n' des premiers rivets est égal à celui n des seconds ($2n' = n$). Le frottement entre les surfaces en contact devant être plus grand pour les cornières et l'âme que pour les cornières et les plates-bandes, il en résulte que lorsqu'on a des cornières à ailes inégales, il est rationnel de placer l'aile la plus longue contre l'âme, afin de pouvoir, dans le même intervalle, avoir $2n' > n$, ou bien, ce qui est plus facile, afin de pouvoir faire $d' > d$.

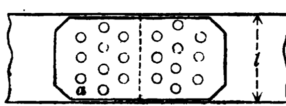
376. Couvre joints. Lorsque les pièces de tôle sont rivées après avoir fait simplement superposer leurs extrémités, l'effort de traction tend à

mettre les pièces de tôle en prolongement l'une de l'autre, et il en résulte une composante poussant à la rupture des rivets et provoquant une déformation. On évite cet effet dans les pièces de charpente au moyen de couvre-joints.

Lorsque la pièce ne se compose que d'une épaisseur de tôle, il faut nécessairement un couvre-joint sur chaque face. Quand la pièce se compose de deux épaisseurs de tôle, si l'on ne mettait qu'un couvre-joint du côté de la tôle interrompue, le couvre-joint supporterait la moitié de la tension de la lame interrompue ou 1/4 de la tension totale, et la lame non interrompue les 3/4 de cette tension totale; il faut donc mettre un second couvre-joint sur la face de la lame non interrompue.

A mesure que le nombre des lames augmente, comme on a soin qu'en un même point il n'y ait qu'une lame interrompue, la surcharge infligée aux lames non interrompues diminue rapidement; c'est ce qui fait que dans certains cas on peut ne mettre qu'un seul couvre-joint.

Fig. 105.



Disposition des rivets sur les couvre-joints. Le nombre n des rivets à mettre de chaque côté du joint étant déterminé, N étant le nombre des rivets de la première rangée, la section résistante est $(l - Nd)e$.

R étant la résistance par unité de surface d'une section dans laquelle il n'y a pas de rivets, et R′ la résistance de la section réduite par la présence des rivets, on a $R' > R$; et comme la résistance totale de la section réduite doit être égale à celle d'une section non réduite, on a :

$$Rel = R'(l - Nd)e;$$

d'où l'on tire, en faisant $R' = 1{,}1R$, ce qui est convenable :

$$N = \frac{l}{11d}.$$

N est le nombre de rivets qu'on peut mettre à chaque rang; mais comme les rivets du premier rang a diminuent l'effort transmis à ceux du rang suivant, par suite de l'adhérence, qui fait passer une partie de la traction dans le couvre-joint, il en résulte qu'on peut mettre au second rang un plus grand nombre de rivets, en tenant compte de la réduction de l'effort total à transmettre. Comme ce qui a lieu pour le bord du couvre-joint a lieu pour le bord de la tôle, on est conduit à distribuer les rivets symétriquement sur chaque côté du couvre-joint.

377. Perçage de la tôle pour recevoir les rivets. Il se fait à l'aide d'un poinçon en acier manœuvré mécaniquement. La résistance du poinçon à l'écrasement devant être plus grande que la résistance à l'arrachement de la surface cylindrique qu'il met à jour dans la tôle qu'il traverse, on doit avoir :

$$\frac{\pi d^2}{4} R > \pi d e R_1.$$

R résistance du poinçon à l'écrasement par millimètre carré de section; $R = 100$ kilog. environ pour l'acier fondu;

R_1 résistance de la pièce percée à l'arrachement; $R_1 = 30$ kilog. environ par millimètre carré pour la tôle.

Substituant ces valeurs de R et R_1 dans l'inégalité précédente, on en conclut :

$$d > 1,2e.$$

Ainsi le diamètre d du trou sera au minimum égal à 1,2 fois l'épaisseur de la tôle. Dans la pratique on prend généralement :

$$d = 2e.$$

378. Définitions des fers du commerce, *d'après M. Rouvenat, dans son Essai sur l'emploi des fers à double* T. Ces définitions ont pour base leur mode de fabrication (438 et suivants).

La méthode anglaise de fabrication du fer, qui s'est généralisée dans presque toutes les usines françaises depuis 1819, consiste à convertir successivement des minerais, plus ou moins nettoyés ou lavés, en fonte brute, puis en une série de produits intermédiaires entre la fonte brute et le fer fini, par l'emploi des feux de finerie, des fours à puddler et des fours à réchauffer, des laminoirs de toute espèce et des marteaux, et par la substitution des combustibles minéraux au combustible végétal.

Le minerai mis en fusion produit la *fonte brute,* laquelle est transformée en fonte qu'on affine, dite *fine metal,* et cette *fonte fine metal* est, par le puddlage, transformée en fer puddlé brut, dit *fer* n° 1.

Les deux premières opérations sont en usage dans tous les pays où le combustible minéral est abondant et à bas prix. Dans ceux où le charbon de bois est d'un prix modéré, et les minerais souvent plus purs, on améliore le chauffage en le produisant avec du coke et du charbon de bois, ou seulement avec ce dernier combustible, et alors une seule opération remplace les deux premières : le minerai mis en fusion produit de la fonte d'assez bonne qualité, dite *fonte d'affinage* ou *fonte de forge,* qui est équivalente au *fine metal* des Anglais, et laquelle, puddlée, donne le fer n° 1.

Le fer n° 1 est faible, dur, aigre et cassant; il est dépourvu de malléabilité pour la forge, mais chauffé à blanc il peut être soudé à la grosse forge; il est d'une texture plus fine que celle de la fonte et moins fine que celle du fer malléable; sa densité est supérieur à celle de la fonte et inférieure à celle du fer fini; sa résistance à la traction est intermédiaire entre celle des fontes grises de la meilleure qualité et celle des fers de forge malléables de la moindre qualité et les moins résistants.

Ce fer brut n° 1 est converti en *fer malléable,* propre à la forge de construction, par une opération appelée *ballage.* On coupe les barres de fer n° 1; on en fait des trousses composées de plusieurs assises, afin de donner beaucoup d'étirage, soit en paquets à simple pile, soit en paquets à double pile; on les chauffe au blanc, puis on les lamine. Chaque

trousse donne ainsi une barre de *fer* n° 2, d'une composition plus pure, d'une texture plus serrée, et suffisamment malléable pour la forge de construction.

Lorsqu'on veut obtenir une qualité supérieure au n° 2, on augmente l'épaisseur des paquets (lesquels peuvent comprendre jusqu'à 6 assises), afin d'obtenir plus d'étirage que pour le n° 2; on chauffe au blanc, et l'on soude les pièces entre elles au marteau frontal, ce qui produit un refroidissement; on chauffe de nouveau pour revenir au blanc, puis on étire au laminoir. Le fer puddlé n° 1 ainsi traité, subissant deux chauffages, un martelage et un laminage, s'est fortement épuré; il est dit *corroyé* : c'est le fer n° 3.

Des trousses composées de fer n° 1 et de fer n° 2 produisent du *fer* n° 4, qui est encore supérieur en malléabilité et en force à la traction.

On parvient à faire des *fers fins*, dits *extra-forts* et *supérieurs*, par de nouveaux corroyages au marteau, en variant encore la composition des trousses et en traitant la fonte d'affinage ou le *fine metal* uniquement au charbon de bois.

Les fers n°s 2, 3 et 4 sont désignés, comme espèce, par le mot *métis*, et, sous le rapport de la qualité, par les mots : *ordinaire*, *petit-fort* ou *demi-fort* et *fort*.

Le fer laminé métis n° 2 à la houille est le fer usuel, marchand; son cours sert de régulateur pour les métis n°s 3 et 4 à la houille corroyés, dits battus ou martelés, pour les métis bois, et pour les extra, houille ou bois.

Au tableau page 415, sous le rapport de la résistance à la traction, les fers sont divisés : en fer faible, de gros échantillons, d'une résistance de 25 kilog. à la traction; en fer moyen d'une résistance de 40 kilog., et en fer fort, de petit échantillon, d'une résistance de 60 kilog.

Les trois types de fer qui ont fourni ces résultats appartiennent à l'ancienne fabrication. Les fers métis, auxquels on a cherché par des corroyages convenables à donner les résistances de ces types, ne pouvaient atteindre à celle de 60 kilog., qui appartient aux fers extra-forts et supérieurs; ils commencent à la résistance inférieure de 25 kilog. et s'arrêtent à celle moyenne de 40 kilog.

Indépendamment de ces catégories de fer, au point de vue métallurgique, le commerce distingue, au point de vue de la forme et des applications, les fers marchands comprenant les fers ronds, les fers carrés, les feuillards et rubans, les fers plats, les tôles, les fers à planchers à simple et à double T, les fers en U, les fers à vitrage, les fers à moulure et un grand nombre de fers spéciaux. Nous donnerons les dimensions et les poids des échantillons les plus usuels de ces produits (403 à 407).

379. Tableau, pour les diverses catégories de fonte et de fer, des valeurs minima, moyenne et maxima, par millimètre carré :

1° De la charge de rupture par traction R par millimètre carré (p. 415, 421 et 423);
2° De la charge p correspondant à la limite d'élasticité (p. 412);
3° De l'allongement i par mètre *id.* (p. 412);
4° Du module d'élasticité E *id.* (p. 412, 420 et 422);

MATIÈRES.		R	p	i	E
		kil.	kil.	mèt.	
Fonte grise.	Ordinaire.	8,500	2,833	0,0004271	6633,107 000
		10,000	3,556	0,0004503	7 896,957 000
		11,499	4,277	0,0004736	9 030,827 000
	Demi-forte.	11,500	4,278	0,0004736	9 032,939 000
		13,250	5,120	0,0005007	10 225,684 000
		14,999	5,962	0,0005277	11 298,085 000
	Forte.	15,000	5,963	0,0005278	11 298,085 000
		16,500	6.685	0,0005510	12 132,486 000
		18,000	7,407	0,0005742	12 889,686 000
Fer dur brut, n° 1, non livré au commerce.		18,000 à 24.999	»	»	»
Fer laminé métis, à la houille.	n° 2, ordinaire.	25,000	10,777	0,0006827	15 785.850 000
		27,500	11,981	0,0007214	16 607,984 000
		30,000	13,185	0,0007601	17 346,401 000
	n° 3, petit-fort ou demi-fort (corroyé).	30,001	13,185	0,0007601	17 346,401 000
		32,500	14,389	0,0007988	18 013.269 000
		35,000	15,592	0,0008376	18 615,090 000
	n° 4, fort (corroyé 1/2 roche).	35,001	15,592	0.0008376	18 615,090 000
		37,500	16,796	0,0008762	19 169,139 000
		40,000	18,000	0,0009150	19 672,131 000
Fer de roche corroyé, martelé, battu.	extra-fort.	40,001	18,000	0,0009150	19 672,131 000
		45,000	20,407	0,0009924	20 563,280 000
		50,000	22,814	0,0010698	21 325,480 000
	supérieur.	50,001	22,814	0,0010698	21 325,480 000
		55,000	25,222	0,0011472	21 985,704 000
		60,000	27,629	0,0012247	22 559,810 000

380. Résistance des bois traversés par des vis. Des *vis à bois* de $0^m,050$ de longueur, de $0^m,0056$ de diamètre en dehors des filets, et de $0^m,0028$ au noyau, engagées par 12 filets dans des planches de $0^m,027$ d'épaisseur, peuvent être chargées en toute sécurité de 35 kilog. pour le sapin, de 68 kilog. pour le chêne, de 71 kilog. pour le frêne sec et de 59 kilog. pour l'orme sans que ces planches courent aucun risque (431).

381. Résistance des bois à la compression. *Résultats d'expériences.* D'après Rondelet, un cube de chêne chargé suivant la longueur de ses fibres s'écrase sous une charge de 385 à 462 kilog. par centimètre carré de section, et un cube de sapin sous celle de 439 à 462 kilog.; de plus, cette charge de rupture reste à peu près la même tant que la longueur de la pièce prismatique ne dépasse pas 7 à 8 fois le côté ou le plus petit côté de la section transversale, supposée carrée ou rectangulaire.

Des expériences faites par E. Hodgkinson sur trois cylindres en bois de teak de $0^m,0127$, $0^m,0254$ et $0^m,0508$ de diamètre, et d'une hauteur double du diamètre, établissent que la résistance à l'écrasement est à très peu près proportionnelle à la section.

Le même expérimentateur rapporte les résultats suivants obtenus avec des cylindres de $0^m,0254$ de diamètre et de $0^m,0508$ de hauteur. Les premiers résultats sont relatifs à des bois à l'état ordinaire de sécheresse, et les seconds à des bois ayant séjourné pendant deux mois dans une étuve.

28

ESSENCE DES BOIS.	RÉSISTANCE à l'écrasement par centim. carré. Bois à l'état ordinaire.	Bois très sec	ESSENCE DES BOIS.	RÉSISTANCE à l'écrasement par centim. carré. Bois à l'état ordinaire.	Bois très sec.
	kil.	kil.		kil.	kil.
Aune	480	489	Chêne de Québec. . .	297	421
Frêne.	610	658	Chêne anglais	456	707
Laurier.	528	528	Chêne de Dantzick, très sec.	»	543
Hêtre.	543	658	Pin résineux	477	477
Bouleau d'Amérique..	»	820	Pin jaune rempli de térébenthine	378	383
Bouleau d'Angleterre.	232	450	Pin rouge.	379	528
Cèdre.	399	412	Peuplier	218	360
Pommier sauvage. . .	457	502	Prunier.	579	737
Sapin rouge.	404	463	Sycomore.	498	»
Sapin blanc.	477	513	Teak	»	850
Sureau	524	701	Larix	225	391
Orme.	»	726	Noyer.	426	508
Sapin de Prusse . . .	457	479	Saule.	203	431
Horn-Beam.	319	512			
Acajou	576	576			

D'après Rondelet, la résistance d'un cube de bois à l'écrasement étant représentée par 1, la résistance proportionnelle des poteaux prend les valeurs du tableau ci-dessous, dans lequel r désigne le rapport de la hauteur du poteau au côté ou au plus petit côté de sa section transversale. Les nombres de la dernière ligne horizontale de ce tableau indiquent, en kilogrammes, les charges permanentes qu'on peut faire porter aux poteaux en chêne fort par centimètre carré de section, en admettant, avec Rondelet, que pour un cube de chêne la charge de rupture est de 420 kilog. par centimètre carré, et que, d'une manière générale, pour les poteaux en bois la charge permanente peut s'élever au 1/7 de la charge de rupture.

Rapport r	1	12	24	36	48	60	72
Résistance proportionnelle. . .	1	$\frac{5}{6}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{12}$	$\frac{1}{24}$
Charge permanente en kilog. .	60	50	30	20	10	5	2,5

Morin, en représentant les résultats de ce tableau par une courbe rectifiée, a obtenu pour les poteaux en chêne les charges permanentes p, en kilog. par centimètre carré, consignées en tête du tableau suivant. De ces charges permanentes p nous déduisons les charges permanentes totales P qu'on peut faire supporter aux poteaux en chêne de diverses dimensions et à section carrée. Le tableau suivant contient ces charges P en kilogrammes, le côté b de la section transversale du poteau en centimètres, la surface s de cette section en centimètres carrés, et la hauteur l du poteau en mètres.

Nota. — On calculera la charge d'un poteau rectangulaire en multipliant la résistance du poteau carré, dont le côté est égal à sa plus petite dimension transversale, par le rapport de la plus grande dimension de la section transversale à la plus petite dimension de cette section.

RAPPORT *r*. . . .			12	14	16	18	20	22	24	28	32	36	40	48	60	72
CHARGE PERMANENTE *p*. . . .			44,3	42,0	39,4	37,0	35,0	32,7	30,0	26,0	22,0	19,1	15,4	10,2	5,4	2,5
Côté *b*	Section *s*															
10	100	*l*	1,20	1,40	1,60	1,80	2,00	2,20	2,40	2,80	3,20	3,60	4,00	4,80	6,00	7,2
		P	4430	4200	3940	3700	3500	3270	3000	2600	2200	1910	1540	1020	540	25
11	121	*l*	1,32	1,54	1,76	1,98	2,20	2,42	2,64	3,08	3,52	3,96	4,40	5,28	6,60	7,9
		P	5360	5082	4767	4477	4235	3957	3630	3146	2662	2311	1863	1234	653	30
12	144	*l*	1,44	1,68	1,92	2,16	2,40	2,64	2,88	3,36	3,84	4,32	4,80	5,76	7,20	8,6
		P	6379	6048	5674	5328	5040	4709	4320	3744	3168	2750	2218	1469	778	36
13	169	*l*	1,56	1,82	2,08	2,34	2,60	2,86	3,12	3,64	4,16	4,68	5,20	6,24	7,80	9,3
		P	7487	7098	6659	6253	5915	5526	5070	4394	3718	3228	2603	1724	913	42
14	196	*l*	1,68	1,96	2,24	2,52	2,80	3,08	3,36	3,92	4,48	5,04	5,60	6,72	8,40	10,0
		P	8683	8232	7722	7252	6860	6409	5880	5096	4312	3744	3018	1999	1058	49
15	225	*l*	1,80	2,10	2,40	2,70	3,00	3,30	3,60	4,20	4,80	5,40	6,00	7,20	9,00	10,8
		P	9968	9450	8865	8325	7875	7358	6750	5850	4950	4298	3465	2295	1215	56
16	256	*l*	1,92	2,24	2,56	2,88	3,20	3,52	3,84	4,48	5,12	5,76	6,40	7,68	9,60	11,5
		P	11341	10752	10086	9472	8950	8371	7680	6656	5632	4890	3942	2611	1382	64
17	289	*l*	2,04	2,38	2,72	3,06	3,40	3,74	4,08	4,76	5,44	6,12	6,80	8,16	10,20	12,2
		P	12803	12138	11387	10693	10115	9450	8670	7514	6358	5520	4451	2948	1561	72
18	324	*l*	2,16	2,52	2,88	3,24	3,60	3,96	4,32	5,04	5,76	6,48	7,20	8,64	10,80	12,9
		P	14353	13608	12766	11988	11340	10595	9720	8424	7128	6188	4990	3305	1750	81
19	361	*l*	2,28	2,66	3,04	3,42	3,80	4,18	4,56	5,32	6,08	6,84	7,60	9,12	11,40	13,6
		P	15992	15162	14223	13357	12635	11805	10830	9386	7942	6895	5559	3682	1949	90
20	400	*l*	2,40	2,80	3,20	3,60	4,00	4,40	4,80	5,60	6,40	7,20	8,00	9,60	12,00	14,4
		P	17720	16800	15760	14800	14000	13080	12000	10400	8800	7640	6160	4080	2160	100
21	441	*l*	2,52	2,94	3,36	3,78	4,20	4,62	5,04	5,88	6,72	7,56	8,40	10,08	12,60	15,1
		P	19536	18522	17375	16317	15435	14421	13230	11466	9702	8423	6791	4498	2381	110
22	484	*l*	2,64	3,08	3,52	3,96	4,40	4,84	5,28	6,16	7,04	7,92	8,80	10,56	13,20	15,8
		P	21441	20328	19070	17908	16940	15827	14520	12584	10648	9244	7454	4937	2614	121
23	529	*l*	2,76	3,22	3,68	4,14	4,60	5,06	5,52	6,44	7,36	8,28	9,20	11,04	13,80	16,5
		P	23435	22218	20843	19573	18515	17298	15870	13754	11638	10104	8147	5396	2857	132
24	576	*l*	2,88	3,36	3,84	4,32	4,80	5,28	5,76	6,72	7,68	8,64	9,60	11,52	14,40	17,2
		P	25517	24192	22694	21312	20160	18835	17280	14976	12672	11002	8870	5875	3110	144
25	625	*l*	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00	5,50	6,00	7,00	8,00	9,00	10,00	12,00	15,00	18,0
		P	27688	26250	24625	23125	21875	20438	18750	16250	13750	11938	9625	6375	3375	156
26	676	*l*	3,12	3,64	4,16	4,68	5,20	5,72	6,24	7,28	8,32	9,36	10,40	12,48	15,60	18,7
		P	29947	28392	26634	25012	23660	22105	20280	17576	14872	12912	10410	6895	3650	169
27	729	*l*	3,24	3,78	4,32	4,86	5,40	5,94	6,48	7,56	8,64	9,72	10,80	12,96	16,20	19,4
		P	32295	30618	28723	26973	25515	23838	21870	18954	16038	13924	11227	7436	3937	182
28	784	*l*	3,36	3,92	4,48	5,04	5,60	6,16	6,72	7,84	8,96	10,08	11,20	13,44	16,80	20,1
		P	34731	32928	30890	29008	27440	25637	23520	20384	17248	14974	12074	7997	4234	196
29	841	*l*	3,48	4,06	4,64	5,22	5,80	6,38	6,96	8,12	9,28	10,44	11,60	13,92	17,40	20,8
		P	37256	35322	33135	31117	29435	27501	25230	21866	18502	16063	12951	8578	4541	210
30	900	*l*	3,60	4,20	4,80	5,40	6,00	6,60	7,20	8,40	9,60	10,80	12,00	14,40	18,00	21,6
		P	39870	37800	35460	33300	31500	29430	27000	23400	19800	17190	13860	9180	4860	225
31	961	*l*	3,72	4,34	4,96	5,58	6,20	6,82	7,44	8,68	9,92	11,16	12,40	14,88	18,60	22,3
		P	42572	40362	37863	35557	33635	31425	28830	24986	21142	18355	14799	9802	5189	240
32	1024	*l*	3,84	4,48	5,12	5,76	6,40	7,04	7,68	8,96	10,24	11,52	12,80	15,36	19,20	23,0
		P	45363	43008	40346	37888	35840	33485	30720	26624	22528	19558	15770	10445	5530	256
33	1089	*l*	3,96	4,62	5,28	5,94	6,60	7,26	7,92	9,24	10,56	11,88	13,20	15,84	19,80	23,7
		P	48243	45738	42907	40293	38115	35610	32670	28314	23958	20800	16771	11108	5881	272
34	1156	*l*	4,08	4,76	5,44	6,12	6,80	7,48	8,16	9,52	10,88	12,24	13,60	16,32	20,40	24,4
		P	51211	48552	45546	42772	40460	37801	34680	30056	25432	22080	17802	11791	6242	289
35	1225	*l*	4,20	4,90	5,60	6,30	7,00	7,70	8,40	9,80	11,20	12,60	14,00	16,80	21,00	25,2
		P	54268	51450	48265	45325	42875	40058	36750	31850	26950	23398	18865	12495	6615	306
36	1296	*l*	4,32	5,04	5,76	6,48	7,20	7,92	8,64	10,08	11,52	12,96	14,40	17,28	21,60	25,9
		P	57413	54432	51062	47952	45360	42379	38880	33696	28512	24754	19958	13219	6998	324
37	1369	*l*	4,44	5,18	5,92	6,66	7,40	8,14	8,88	10,36	11,84	13,32	14,80	17,76	22,20	26,6
		P	60647	57498	53939	50653	47915	44766	41070	35594	30118	26148	21083	13964	7393	342
38	1444	*l*	4,56	5,32	6,08	6,84	7,60	8,36	9,12	10,64	12,16	13,68	15,20	18,24	22,80	27,3
		P	63969	60648	56894	53428	50540	47219	43320	37544	31768	27580	22238	14729	7798	361
39	1521	*l*	4,68	5,46	6,24	7,02	7,80	8,58	9,36	10,92	12,48	14,04	15,60	18,72	23,40	28,0
		P	67380	63882	59927	56277	53235	49737	45630	39546	33462	29051	23423	15514	8213	380
40	1600	*l*	4,80	5,60	6,40	7,20	8,00	8,80	9,60	11,20	12,80	14,40	16,00	19,20	24,00	28,
		P	70880	67200	63040	59200	56000	52320	48000	41600	35200	30560	24640	16320	8640	40

RAPPORT r. . . .			12	14	16	18	20	22	24	28	32	36	40	48	60	72
CHARGE PERMANENTE p. . . .			44,3	42,0	39,4	37,0	35,0	32,7	30,0	26,0	22,0	19,1	15,4	10,2	5,4	2,5
Côté b	Section s															
41	1681	l	4,92	5.74	6,56	7,38	8 20	9,02	9,84	11,48	13,12	14,76	16,40	19,68	24,60	29,52
		P	74468	70602	66231	62197	58835	54969	50430	43706	36982	32107	25887	17146	9077	4203
42	1764	l	5,04	5,88	6,72	7.56	8,40	9 24	10,08	11,76	13.44	15 12	16,80	20,16	25,20	30,24
		P	78145	74088	69502	65268	61740	57683	52920	45864	38808	33692	27166	17993	9526	4410
43	1849	l	5,16	6,02	6,88	7,74	8.60	9,46	10,32	12,04	13,76	15,48	17,20	20,64	25,80	30,96
		P	81911	77658	72851	68413	64715	60462	55470	48074	40678	35316	28475	18860	9985	4623
44	1936	l	5,28	6.16	7,04	7,92	8,80	9.68	10,56	12,32	14.08	15,84	17.60	21,12	26,40	31,68
		P	85765	81312	76278	71632	67760	63307	58080	50336	42592	36978	29814	19747	10454	4840
45	2025	l	5,40	6.30	7.20	8 10	9,00	9.90	10,80	12,60	14,40	16.20	18,00	21,60	27,00	32,40
		P	89708	85050	79785	74925	70875	66218	60750	52650	44550	38678	31185	20655	10935	5063
46	2116	l	5,52	6,44	7,36	8,28	9,20	10.12	11,04	12,88	14.72	16,56	18,40	22,08	27,60	33,12
		P	93739	88872	83370	78292	74060	69193	63480	55016	46552	40416	32586	21583	11426	5290
47	2209	l	5,64	6.58	7.52	8.46	9,40	10,34	11,28	13.16	15,04	16,92	18,80	22,56	28,20	33,84
		P	97859	92778	87035	81733	77315	72234	66270	57434	48598	42192	34019	22532	11929	5523
48	2304	l	5,76	6.72	7,68	8,64	9,60	10,56	11.52	13,44	15,36	17,28	19,20	23,04	28,80	34,56
		P	102067	96768	90778	85248	80640	75341	69120	59904	50688	44006	35482	23501	12442	5760
49	2401	l	5.88	6,86	7,84	8,82	9,80	10,78	11,76	13,72	15,68	17,64	19,60	23,52	29,40	35,28
		P	106364	100842	94599	88837	84035	78513	72030	62426	52822	45859	36975	24490	12965	6003
50	2500	l	6,00	7,00	8,00	9,00	10 00	11.00	12,00	14,00	16,00	18,00	20,00	24,00	30,00	36,00
		P	110750	105000	98500	92500	87500	81750	75000	65000	55000	47750	38500	25500	13500	6250
51	2601	l	6,12	7,14	8,16	9.18	10.20	11,22	12,24	14,28	16.32	18,36	20,40	24.48	30.60	36.72
		P	115224	109242	102479	96237	91035	85053	78030	67626	57222	49679	40055	26530	14045	6503
52	2704	l	6.24	7,28	8,32	9,36	10.40	11,44	12,48	14,56	16,64	18,72	20,80	24 96	31,20	37,44
		P	119787	113568	106538	100048	94640	88421	81120	70304	59488	51646	41642	27581	14602	6760
53	2809	l	6,36	7,42	8,48	9,54	10.60	11,66	12,72	14,84	16,96	19,08	21.20	25.44	31,80	38,16
		P	124439	117978	110675	103933	98315	91854	84270	73034	61798	53652	43259	28652	15169	7023
54	2916	l	6,48	7,56	8,64	9,72	10,80	11,88	12,96	15,12	17,28	19,44	21.60	25 92	32.40	38,88
		P	129179	122472	114890	107892	102060	95353	87480	75816	64152	55696	44906	29743	15746	7290
55	3025	l	6,60	7,70	8,80	9.90	11.00	12.10	13,20	15,40	17,60	19,80	22,00	26,40	33,00	39,60
		P	134008	127050	119185	111925	105875	98918	90750	78650	66550	57778	46585	30855	16335	7563
56	3136	l	6,72	7,84	8,96	10,08	11,20	12,32	13,44	15.68	17,92	20,16	22.40	26,88	33,60	40,32
		P	138925	131712	123558	116032	109760	102547	94080	81536	68992	59898	48294	31987	16934	7840
57	3249	l	6,84	7,98	9.12	10,26	11.40	12,54	13,68	15,96	18,24	20,52	22,80	27.36	34,20	41,04
		P	143931	136458	128011	120213	113715	106242	97470	84474	71478	62056	50035	33140	17545	8123
58	3364	l	6.96	8,12	9,28	10.44	11.60	12 76	13,92	16,24	18,56	20,88	23,20	27,84	34,80	41,76
		P	149025	141288	132542	124468	117740	110003	100920	87464	74008	64252	51806	34313	18166	8410
59	3481	l	7,08	8,26	9,44	10,62	11.80	12,98	14,16	16.52	18,88	21,24	23.60	28,32	35,40	42.48
		P	154208	146202	137151	128797	121835	113829	104430	90506	76582	66487	53607	35506	18797	8703
60	3600	l	7,20	8.40	9,60	10,80	12,00	13 20	14.40	16,80	19.20	21,60	24,00	28 80	36,00	43,20
		P	159480	151200	141840	133200	126000	117720	108000	93600	79200	68760	55440	36720	19440	9000
61	3721	l	7,32	8,54	9,76	10.98	12,20	13.42	14,64	17,08	19.52	21,96	24.40	29,28	36,60	43,92
		P	164840	156282	146607	137677	130235	121677	111630	96746	81862	71071	57303	37954	20093	9303
62	3844	l	7,44	8,68	9,92	11,16	12,40	13 64	14,88	17,36	19,84	22,32	24,80	29,76	37,20	44,64
		P	170289	161448	151454	142228	134540	125699	115320	99944	84568	73420	59198	39209	20758	9610
63	3969	l	7,56	8,82	10,08	11,34	12.60	13.86	15,12	17,64	20,16	22,68	25.20	30,24	37,80	45,36
		P	175827	166698	156379	146853	138915	129786	119070	103194	87318	75808	61123	40484	21433	9923
64	4096	l	7.68	8,96	10,24	11.52	12,80	14.08	15,36	17,92	20,48	23,04	25,60	30,72	38.40	46,08
		P	181453	172032	161382	151552	143360	133939	122880	106496	90112	78234	63078	41779	22118	10240
65	4225	l	7.80	9.10	10,40	11,70	13,00	14,30	15.60	18.20	20,80	23,40	26,00	31,20	39,00	46,80
		P	187168	177450	166465	156325	147875	138158	126750	109850	92950	80698	65065	43095	22815	10563
66	4356	l	7,92	9,24	10,56	11,88	13 20	14.52	15,84	18,48	21.12	23,76	26.40	31,68	39,60	47,52
		P	192971	182952	171626	161172	152460	142441	130680	113256	95832	83200	67082	44431	23522	10890
67	4489	l	8,04	9.38	10.72	12,06	13,40	14.74	16,08	18,76	21,44	24,12	26,80	32,16	40,20	48,24
		P	198863	188538	176867	166093	157115	146790	134670	116714	98758	85740	69131	45788	24241	11223
68	4624	l	8,16	9,52	10,88	12,24	13.60	14,96	16,32	19,04	21,76	24 48	27 20	32,64	40,80	48,96
		P	204843	194208	82186	171088	161840	151205	138720	120224	101728	88318	71210	47165	24970	11560
69	4761	l	8,28	9,66	11,04	12,42	13,80	15,18	16,56	19.32	22,08	24,84	27.60	33.12	41,40	49,68
		P	210912	199962	187583	176157	166635	155685	142830	123786	104742	90935	73319	48562	25709	11903
70	4900	l	8.40	9,80	11,20	12,60	14,00	15,40	16.80	19,60	22,40	25 20	28.00	33,60	42,00	50.40
		P	217070	205800	193060	181300	171500	160230	147000	127400	107800	93590	75460	49980	26460	12250

382. Observations sur le tableau précédent. Charge d'un poteau rectangulaire. Le tableau précédent a été calculé d'après la règle de Rondelet, déduite de ses expériences. On doit remarquer que la charge par centimètre carré d'un poteau ou d'une pièce de bois à section rectangulaire soumise à la compression ne dépend (à part l'essence considérée) que du rapport $\frac{l}{c}$ de la longueur de la pièce au plus petit côté de sa section transversale. Par conséquent, si l'on double les dimensions d'un poteau (hauteur et côtés), la charge par centimètre carré reste la même; mais la charge totale a quadruplé comme la section transversale elle-même. On peut vérifier cette loi dans le tableau précédent, en comparant les charges de deux poteaux dont les dimensions sont dans le rapport de 1 à 2. Nous retrouverons cette loi pour les solides (fonte et fer) soumis à la compression (388).

383. Lois de Navier et Duleau sur la compression des bois. Expériences d'Hodgkinson sur les poteaux en bois.

Navier et Duleau ont établi que, théoriquement, la résistance à l'écrasement est proportionnelle à :

$$\frac{b^4}{l^2}, \quad \text{ou} \quad \frac{ab^3}{l^2}, \quad \text{ou} \quad \frac{d^4}{l^2},$$

selon que la section de la pièce est carrée, ou rectangulaire, ou circulaire d'un diamètre d.

E. Hodgkinson a fait quelques expériences sur des poteaux en bois dont la longueur a varié de 30 à 45 fois le côté ou le plus petit côté de la section transversale, et il a reconnu que ses résultats étaient assez bien représentés, suivant que la section est carrée ou rectangulaire, par la formule :

$$P = K\frac{b^4}{l^2}, \quad \text{ou} \quad P = K\frac{ab^3}{l^2}.$$

P résistance à la rupture du poteau, en kilogrammes;
K coefficient constant, que Hodgkinson a trouvé égal à 2565 pour le chêne de Dantzick;
b côté de la section carrée ou petit côté de la section rectangulaire du poteau, en centimètres;
a grand côté de la section rectangulaire, en centimètres;
l hauteur du poteau, en décimètres.

Dans les formules précédentes on fera :

K = 2565 pour le *chêne fort;*
K = 1800 pour le *chêne faible;*
K = 2142 pour le *sapin rouge*, le *sapin blanc fort* et le *pin résineux;*
K = 1660 pour le *sapin blanc faible* et le *pin jaune.*

Pour ne faire travailler les pièces qu'au dixième de la charge de rupture, il suffit de diviser par 10 les valeurs précédentes de K.

Le produit ab^3 étant maximum lorsque $a = b$, les formules précédentes

montrent que, pour une même hauteur l et une même section ab, le poteau à section carrée est le plus résistant.

Le général Morin, en appliquant la formule précédente d'Hodgkinson à un poteau en chêne fort de $0^m,15$ d'équarrissage, et en faisant $K = 256,5$, a obtenu les charges suivantes, en kilog. par centim. carré :

Rapport r. . .	12	14	16	18	20	24	28	32	36	40	48	60	72
Charge	178	131	100	79	64	44,5	32,8	25	19,8	16,0	11,1	7,1	4,9

Ce tableau peut être considéré comme étant d'accord avec celui de la page 434, déduit des expériences de Rondelet, pour les valeurs de r comprises entre 30 et 45, c'est-à-dire pour les valeurs qui ont servi à Hodgkinson dans l'établissement de sa formule ; mais hors de ces limites il y a un désaccord notable, surtout pour les petites valeurs de r.

Quand il s'agit d'une matière aussi altérable que le bois, et en considération de ce que les expériences d'Hodgkinson sont trop peu nombreuses, et qu'elles ont été faites sur des échantillons de choix, nous conseillons de ne pas atteindre les charges de ce dernier tableau hors des limites $r = 30$ à 45, qui ne comprennent pas les valeurs $r = 12$ à 30, les plus ordinaires de la pratique. Dans tous les cas, il convient de suivre la règle de Rondelet ou d'adopter les charges permanentes qui en sont déduites et consignées au tableau page 435.

Les valeurs précédentes de K, que Hodgkinson a déduites de ses expériences, étant sensiblement entre elles dans le rapport des nombres 60, 42, 50 et 37,4, si des expériences n'ont pas fait connaître la résistance du bois qu'on veut employer, on obtiendra des résultats pratiquement satisfaisants en multipliant les valeurs de p et de P, données page 435 pour le chêne fort, d'après la règle de Rondelet, respectivement par $\frac{42}{60} = \frac{7}{10}$, $\frac{50}{60} = \frac{5}{6}$, $\frac{37,4}{60}$ pour le *chêne faible*, le *sapin fort*, le *sapin faible*. Ainsi 60 kilog. étant la charge de sécurité par centimètre carré de la base d'un cube de chêne fort, 42,50 et 37,4 kilog. sont respectivement les charges pour les bois précédents.

384. Formule donnant la charge des bois soumis à la compression. La règle de Rondelet suffit à la rigueur pour le calcul des bois soumis à la compression ; cependant, il est utile d'avoir une formule générale qui donne les résultats pour divers rapports de leur longueur à leur équarrissage. Aussi depuis longtemps, d'après la règle de Rondelet, avons-nous établi la relation suivante : (*)

$$P = \frac{Rs}{0,93 + 0,00185 \left(\frac{h}{c}\right)^2} \qquad (A)$$

dans laquelle

$P =$ *charge totale en kilogrammes ;*
$S =$ *section en centimètres carrés ;*

(*) Cette formule a été proposée, en 1870, par M. L.-A. Barré, dans ses *Éléments de charpenterie métallique* (p. 7).

h *hauteur du poteau;*
c *le plus petit côté de la section transversale rectangulaire du poteau ou de la pièce soumise à la compression;*
R *charge de rupture d'un poteau dont la hauteur ne dépasse pas* 7 *à* 8 *fois le plus petit côté de la section transversale.*

En appliquant la formule ci-dessus, et en prenant pour coefficient de sécurité le 1/7 de la charge de rupture ou 420 kilog. : 7 = 60 kilog., on obtient, pour $s = 1$ centimètre carré, des charges qui s'écartent peu des expériences de Rondelet et des chiffres du général Morin. Nous rapprochons dans le tableau suivant tous ces résultats :

Rapport $\frac{h}{c}$. .	12	14	16	18	20	22	24	28	32	36	40
Rondelet. . .	50k	»	»	»	»	»	30	»	»	20	»
Morin	44k,3	42k	39k,4	37k	35k	32k,7	30k	26k,0	22,k0	19k,1	15k,4
Formule (A).	50	46	42k,7	39k	36k	32k,8	30k	25k,2	21k,2	18k	15k,4

Au delà du rapport $\frac{h}{c} = 40$, notre formule (A) donnerait des valeurs un peu plus grandes que la règle de Rondelet; mais dans les constructions le rapport 40 est rarement atteint. On peut donc adopter la formule ci-dessus (A) pour représenter les expériences de Rondelet. Dans les charpentes, les arbalétriers, les contre-fiches et les poinçons supportent des efforts de compression, et il est indispensable dans le calcul des pièces de charpente de tenir compte de leur longueur. Les divers tronçons d'un arbalétrier peuvent être considérés, le plus souvent, comme des pièces encastrées par les assemblages.

On peut donc appliquer à chaque tronçon les résultats du tableau suivant, qui fera connaître la charge par centimètre carré qu'on ne doit pas dépasser suivant la qualité des bois et le rapport $\frac{h}{c}$ (*).

Nous donnons ci-après le tableau pour les bois très forts, les bois de qualité moyenne et les bois médiocres.

Nous avons pris les coefficients suivants de sécurité ou de compression:

Bois forts (*chêne et sapin*) $\frac{420^k}{7} = 60$ kilog. par centimètre carré,

Bois de qualité moyenne $\frac{350^k}{7} = 50$ kilog. par centimètre carré,

Bois médiocre $\frac{280^k}{7} = 40$ kilog. par centimètre carré.

(*) Nous rappelons, en passant, que souvent les arbalétriers portent des pannes qui, suivant leurs situations, tendent à produire la flexion. Dans ce cas, la section de l'arbalétrier, qui doit être calculée pour résister à la flexion et à la compression, est donnée par la formule connue :

$$R = \frac{C}{\omega} \pm \frac{\mu . n}{I},$$

R coefficient de sécurité; ω = section; C = effort de compression; $\frac{I}{n}$ = module de section; μ moment fléchissant (V. n° 399).

385. Charges par centimètre carré des pièces de bois ou des poteaux soumis à la compression.

RAPPORT $\frac{h}{c}$	COEFFICIENT $60^k = \frac{420^k}{7}$	COEFFICIENT $50^k = \frac{350^k}{7}$	COEFFICIENT $40^k = \frac{280^k}{7}$	RAPPORT $\frac{h}{c}$	COEFFICIENT $60^k = \frac{420^k}{7}$	COEFFICIENT $50^k = \frac{350^k}{7}$	COEFFICIENT $40^k = \frac{280^k}{7}$
	kilog.	kilog.	kilog.		kilog.	kilog.	kilog.
10	53,8	44,8	35,8	26	27,5	22,9	18,3
11	52,0	43,3	34,6	27	26,3	21,9	17,5
12	50,1	41,7	33,4	28	25,2	21,0	16,8
13	48,3	40,2	32,2	29	24,1	20,0	16,0
14	46,4	38,6	30,9	30	23,1	19,2	15,4
15	44,5	37,0	29,6	31	22,1	18,4	14,7
16	42,7	35,6	28,5	32	21,2	17,6	14,1
17	40,9	34,1	27,3	33	20,3	16,9	13,5
18	39,2	32,6	26,1	34	19,5	16,2	13,0
19	37,5	31,2	25,0	35	18,7	15,6	12,5
20	36,0	30,0	24,0	36	18,0	15,0	12,0
21	34,3	28,5	22,8	37	17,3	14,4	11,5
22	32,8	27,3	21,8	38	16,6	13,8	11,0
23	31,4	26,0	20,9	39	16,0	13,3	10,6
24	30,0	25,0	20,0	40	15,4	12,8	10,2
25	28,7	23,9	19,1				

Application du tableau précédent. Soit un arbalétrier de sapin fort dont l'équarrissage est $0^m,20$ de hauteur sur $0^m,15$ et dont le tronçon le plus chargé de $3^m,60$ de longueur supporte un effort de compression de 6400 kilog. Pour vérifier la section, on cherchera le rapport de la longueur $3^m,60$ au plus petit côté $0^m,15$ de la section transversale, ce qui donne 24. Pour ce rapport, le tableau précédent donne 30 kilog. par centimètre carré pour la charge pratique de l'arbalétrier. D'autre part, la section transversale étant de :

$$0^m,15 \times 0^m,20 = 300 \textit{ centimètres carrés},$$

il en résulte que l'arbalétrier supporte seulement un effort de :

$$\frac{6\,400^k}{300} = 21 \text{ kilog. par centimètre carré.}$$

On en conclut que la section adoptée est plus que suffisante. Nous rappelons que dans un tel calcul il faut compter largement les sections des bois, afin de tenir compte des assemblages.

386. Poteaux à section circulaire. Jusqu'à ce que la résistance de ces poteaux ait été déterminée par expérience, on peut la supposer égale à celle des poteaux de même hauteur et de section carrée équivalente. Du reste, on emploie rarement les poteaux à section circulaire, si ce n'est dans les travaux de mines, et à moins qu'on ne fasse usage d'arbres sensiblement écorcés pour certaines constructions provisoires.

Les *pilots* enfoncés complètement en terre se chargent à 30 et 35 kilog., et même quelquefois plus, par centimètre carré de section.

387. Fonte soumise à la compression. E. Hodgkinson a soumis à la compression des barres de fonte de 3^{m},05 de longueur sur 6$^{cent. q}$,45 de section; toutes les précautions étaient prises pour les empêcher de fléchir, et des résultats obtenus il résulte que, jusque vers la charge de 17^{k},41 par millimètre carré de section, les compressions totales sont sensiblement proportionnelles aux charges, et que, jusqu'à la charge de 23^{k},27, les compressions élastiques, c'est-à-dire les compressions totales moins les compressions permanentes, sont exactement proportionnelles aux charges. Les compressions permanentes sont tellement faibles jusque vers les charges de 10 à 12 kilogr. par millimètre carré, qu'elles sont négligeables dans la pratique.

Le coefficient ou module d'élasticité par compression a été en moyenne, jusqu'à la charge de 17^{k},41 (en le rapportant au millim. carré):

$$E = 8804{,}764000. \qquad (\text{n}^\circ\ 339)$$

Comme on a pour l'extension E = 9096,070000 (page 422), on peut donc supposer que, dans les limites de charges de la pratique, la fonte résiste également à l'extension et à la compression, et prendre pour E la moyenne des deux valeurs précédentes, c'est-à-dire 8950,417000.

Des expériences antérieures à celles de E. Hodgkinson avaient conduit à faire E = 12000,000000 pour les fontes grises à grains fins (page 412) (*par millim. carré*).

Charge de rupture de la fonte par compression. Des expériences de E. Hodgkinson, il résulte que la résistance à la rupture est sensiblement constante pour des hauteurs de pièces variant de 1 à 5 fois la plus petite dimension de la section transversale; en deçà la résistance est plus grande, et au delà elle diminue rapidement à mesure que ce rapport augmente. Des expériences sur 18 espèces de fonte ont donné une résistance moyenne à la rupture de 6321 kilog. par centimètre carré, pour les pièces dont la hauteur varie de 1 à 5 fois la plus petite dimension de la section transversale; mais comme cette résistance a varié de 3965 à 11153 d'une fonte à une autre, il y a donc lieu, dans la pratique, d'essayer les fontes qu'on veut employer. La résistance généralement admise est de 10000 kilog., nombre qu'il paraît convenable de réduire à 8000 kilog., et même à 7500 kilog.

E. Hodgkinson a soumis à des efforts de rupture par compression des piliers en fonte provenant des forges de Low-Moor (Yorkshire) de bonne qualité, à grains gris assez serrés et de dureté moyenne, d'une résistance maximum de 8133 kilog. par centimètre carré. De ses expériences il a conclu que pour les colonnes dont la hauteur varie de 30 à 120 fois le diamètre, on a respectivement pour les colonnes pleines et les colonnes creuses, à bases planes et perpendiculaires à l'axe,

$$P = 10676\,\frac{d^{3,6}}{l^{1,7}} \quad \text{et} \quad P = 10676\,\frac{d^{3,6} - d'^{3,6}}{l^{1,7}}.$$

P effort de rupture en kilogrammes;
d diamètre de la colonne pleine ou diamètre extérieur de la colonne creuse, en centimètres;

d' diamètre intérieur de la colonne creuse, en centimètres ;
l hauteur de la colonne, en décimètres.

Pour des piliers plus courts, Hodgkinson a donné la formule ;

$$P' = \frac{PR}{P + \frac{3}{4}R}.$$

P' effort de rupture, en kilogrammes ;
P effort calculé par l'une des formules précédentes ;
R effort de rupture du pilier expérimenté en supposant sa hauteur égale à 1 fois 1/2 son diamètre ; R est égale à 8133 kilog. multiplié par la section de la colonne en centimètres carrés.

Comme dans la pratique il est prudent que les colonnes en fonte ne travaillent au plus qu'à 1/6 de la charge de rupture, il faudra remplacer le coefficient numérique 10676 des formules précédentes par 1780 environ.

Dans aucun cas la charge permanente ne doit dépasser le 1/4 ou même le 1/5 de celle de rupture, même pour des ouvrages provisoires ne présentant pas de grands risques.

En général, on peut admettre que les fontes ne s'écrasent que sous des charges d'environ 8000 ou 7500 kilog. par centimètre carré. En employant des fontes d'une résistance sensiblement différente de 8133 kilog., il suffirait de multiplier le coefficient numérique des formules précédentes par le rapport de la résistance de fonte employée à la résistance 8133 kilog.

Formule de Love. M. G. H. Love a donné la formule suivante, plus simple que la précédente, représentant les résultats d'Hodgkinson et s'appliquant à tous les piliers en fonte dont la hauteur varie de 4 à 120 fois le diamètre :

$$P = \frac{R}{1,45 + 0,00337\left(\frac{l}{d}\right)^2}. \qquad (a)$$

P charge de rupture ;
R comme ci-dessus, charge de rupture du pilier supposé très court ; c'est la résistance 7500 ou 8000 kilog. multipliée par la section du pilier en centimètres carrés ;
l et d dimensions du pilier *rapportées à la même unité, le mètre par exemple.*

Pour les piliers dont la hauteur l varie de 5 à 30 fois le diamètre d, M. Love a donné la formule plus simple :

$$P = \frac{R}{0,68 + 0,1\,\frac{l}{d}}. \qquad (b)$$

Admettant la charge de rupture de la fonte égale à 7500 kilog. par centimètre carré, en la faisant travailler à 1/6 de la rupture, c'est-à-dire à 1250 kilog. par centimètre carré, la formule (a) donne, pour la

charge qu'on peut faire porter en toute sécurité à une colonne pleine :

$$P = \frac{1\,250 \times s}{1{,}45 + 0{,}003\,37 \left(\frac{l}{d}\right)^2}. \qquad (a')$$

$s = \frac{\pi d^2}{4}$ section de la colonne, en centimètres carrés.

Faisant $s = 1$ dans cette formule, on en tire pour P les valeurs p suivantes, qui représentent les charges permanentes qu'on peut faire porter aux colonnes en fonte, par centimètre carré:

Rapport $r = \frac{l}{d}$. .	< 5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Charge p en kilog.	1250	700	447	279	183	127	92	70	54	43	36

C'est à l'aide de la formule (a') que nous avons calculé les charges P du tableau page 447, que l'on peut faire porter aux colonnes en fonte.

Les formules (a) et (b) ne sont pas d'accord. Pour les faibles rapports les formules (a) ou (a') donnent pour les charges de compression des valeurs un peu faibles, ainsi que l'on peut le constater en examinant la charge par centimètre carré répondant au rapport 10, qui est de 700 kilog. et qui devrait se rapprocher davantage de la charge de rupture 1 250 pour une petite hauteur.

La formule (b) donne des valeurs trop fortes pour les grands rapports.

Depuis longtemps, divers auteurs ont signalé les anomalies de ces formules, et l'on pourrait les remplacer par une formule unique que M. L.-A. Barré a proposé, en 1880, dans la *Semaine des Constructeurs* (n° 7, vol. 5).

Voici cette formule qui fait disparaître les anomalies signalées :

$$P = \frac{1\,250}{1{,}2 + 0{,}0039 \left(\frac{l}{d}\right)^2}.$$

Résistances comparées de la fonte à la compression et à l'extension. Des expériences d'Hodgkinson ont donné 6,595 pour le rapport moyen de la résistance à la rupture d'une bonne fonte par compression à la résistance par traction, et, d'après cet auteur, il y a lieu de considérer cette moyenne comme un peu faible; il pense qu'elle est comprise entre 7 et 8 pour une même fonte. D'autres expériences ne lui ont donné cependant que 5,637 pour ce rapport moyen. C'est là une exception.

Qu'une même fonte ait été préparée à l'air froid ou à l'air chaud, sa résistance paraît être la même, soit à la traction, soit à la compression.

De ses expériences, Hodgkinson a conclu :

1° Que la résistance à la rupture d'un pilier est réduite au 1/3 au moins quand l'effort qu'il supporte est dirigé suivant la diagonale et non suivant l'axe;

2° Que la résistance des piliers longs est 3 fois plus grande quand les extrémités sont plates et perpendiculaires à l'axe et à la direction de l'effort, que quand elles sont arrondies. Dans le premier cas, elles sont comme encastrées;

3° Qu'un pilier long, de section uniforme, dont les extrémités sont solidement fixées par des disques, des embases ou de toute autre manière, présente la même résis-

tance qu'un pilier de même section et d'une longueur moitié moindre, mais dont les extrémités seraient arrondies, même si l'effort était dirigé suivant l'axe. Cela revient à dire que le bénéfice de l'encastrement des colonnes et des piliers se traduit pour des solides de même section, également chargés, par une hauteur double pour le solide encastré à ses deux extrémités (Voir n° 92 *bis*) ;

4° Le renflement des colonnes vers le milieu de leur longueur augmente leur résistance du 1/8 au 1/7.

Ces indications générales très importantes sont précisées par les formules nos 389 à 392.

Pour les *colonnes creuses*, on peut admettre, d'après les expériences d'Hodgkinson, que la résistance est égale à la résistance de la colonne supposée pleine, moins celle d'une colonne pleine de même hauteur ayant pour section transversale celle du vide.

Ainsi dans la pratique, conformément à la formule (a'), on a :

$$P = \frac{1\,250 \times s}{1{,}45 + 0{,}003\,37\left(\frac{l}{d}\right)^2} - \frac{1\,250 \times s'}{1{,}45 + 0{,}003\,37\left(\frac{l}{d'}\right)^2}.$$

P charge, en kilogrammes, qu'on peut faire porter en toute sécurité à la colonne creuse;

d diamètre extérieur de la colonne et d' diamètre du vide intérieur;

$s = \frac{\pi d^2}{4}$ section de la colonne supposée pleine, et $s' = \frac{\pi d'^2}{4}$ section du vide, en centimètres carrés;

l hauteur de la colonne. Cette hauteur et les deux diamètres sont rapportés à la même unité, le mètre par exemple.

La table de la page 447 permettra d'apprécier, sans calcul ou par une simple interpolation, la valeur numérique du premier et du second terme de la valeur de P, c'est-à-dire les charges qu'on peut faire porter respectivement à la colonne pleine de diamètre d et à celle de diamètre d'.

Épaisseur des colonnes creuses. Les limites inférieures des épaisseurs de la fonte des colonnes creuses sont respectivement pour des hauteurs de colonnes de :

$l = 2^m$ à 3^m	3^m à 4^m	4^m à 6^m	6^m à 8^m,
$e = 0^m{,}012$	$0^m{,}015$	$0^m{,}020$	$0^m{,}025$.

387 *bis*. **Fer soumis à la compression.** Des expériences d'Hodgkinson, il résulte que jusque vers la charge de 1 400 à 1 800 kilog. par centimètre carré, la compression du fer est proportionnelle à la charge, et que jusqu'à cette limite le coefficient d'élasticité est en moyenne, en le rapportant au millimètre carré :

$$E = 16\,295{,}000\,000.$$

Cette valeur de E diffère peu de celle relative à l'extension (p. 420). Aussi, comme pour la fonte, on pourra les supposer égales.

Cette valeur est presque double de celle trouvée pour la fonte (p. 441). Ainsi dans les limites de la non-altération de l'élasticité (14 kilog. par millimètre carré de section de fer), la fonte se comprime près de deux fois autant que le fer. A part le prix, il y a donc lieu de donner la préférence au fer sur la fonte au point de vue de la sécurité.

Au delà de la limite d'élasticité, le fer se déforme beaucoup plus rapidement que la fonte, et il s'écrase sous des charges qui ne sont que la moitié et quelquefois le tiers de celles qui écrasent la fonte.

Charge de rupture du fer. On admettait, il y a quelques années, que des prismes courts en fer s'écrasaient sous des charges de 4955 kilog. par centimètre carré de section; les dernières expériences semblent devoir faire réduire ce chiffre à 4000 kilogr. pour le bon fer en barres laminé, à 3600 kilog. pour les fers de colonnes, qui sont d'un fort échantillon, et à 3800 kilog. environ pour les tôles de bonne qualité à cassure fibreuse ou cristalline, d'une épaisseur de 1/2 à 15 millimètres.

Formules de M. Love. D'après les expériences d'Hodgkinson, M. Love a établi pour les colonnes en fer des formules analogues à celles données ci-dessus pour les colonnes en fonte. En conservant aux lettres les mêmes significations, les formules (a) et (b) (p. 442) deviennent respectivement :

Pour des hauteurs comprises entre 10 et 180 fois le diamètre, la charge de rupture a pour expression :

$$P = \frac{R}{1{,}55 + 0{,}0005 \left(\frac{l}{d}\right)^2}, \qquad (a_1)$$

R étant la charge de rupture d'un prisme court, multipliée par la section de la colonne en centimètres carrés.

Pour des hauteurs comprises entre 5 et 30 fois le diamètre, on a :

$$P = \frac{R}{0{,}85 + 0{,}04 \frac{l}{d}}. \qquad (b_1)$$

Admettant que la charge de rupture du fer (prisme court) soit de 3600 kilog. par centimètre carré et en faisant travailler ce métal à 1/6 de la charge de rupture, c'est-à-dire à 600 kilog. par centimètre carré, la formule (a_1) donne la charge pratique :

$$P = \frac{600 \times s}{0{,}55 + 0{,}0005 \left(\frac{l}{d}\right)^2}, \qquad (a'_1)$$

s étant la section de la colonne en centimètres carrés.

Faisant $s=1$ dans cette formule, on en tire les valeurs p suivantes, qui sont les charges par centimètre carré des colonnes pleines en fer :

Rapport $r=\frac{l}{d}$. . . .	< 5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Charge p en kilog . .	600	375	343	300	255	214	179	150	126	107	92

C'est à l'aide de la formule (a'_1) que nous avons calculé les charges P, du tableau page 447, qu'on peut en toute sécurité faire porter aux colonnes en fer.

388. Instruction relative à l'emploi du tableau donnant les charges

des colonnes en fonte et en fer (p. 447). *Colonnes en fonte.* Ces tableaux ont été calculés avec le coefficient de sécurité égal au 1/6 de la charge de rupture, savoir :

$$\frac{7\,500^{k}}{6} = 1\,250 \textit{ kilog. par centimètre carré.}$$

Si l'on veut une sécurité plus grande, on pourra adopter, comme certains praticiens, pour coefficient de sécurité :

$$\frac{7\,500}{7} = 1\,071 \text{ kilog. par centimètre carré.}$$

Dans ce cas, il suffira de diminuer les résultats de nos tableaux de 1/7.

Pour le coefficient de sécurité :

$$\frac{7\,500}{8} = 937^{k},5 \text{ par centimètre carré,}$$

il faudrait prendre les 3/4 des charges données par nos tableaux.

Colonnes en fer. Les tableaux se rapportant aux colonnes en fer ont été calculés avec le coefficient de sécurité égal au 1/6 de la charge de rupture d'un prisme court, prise égale à 3600 kilog. ; c'est-à-dire :

$$\frac{3\,600}{6} = 600 \textit{ kilog. par centimètre carré.}$$

Pour une sécurité plus grande, 1/7 ou 1/8 de 3 600 kilog., on réduira les charges de nos tableaux de 1/7 ou l'on en prendra les 3/4.

Nota. — Nous rappelons ici, pour les colonnes métalliques soumises à la compression, une loi de similitude géométrique, signalée n° 382 à propos des poteaux en bois : La charge d'une colonne métallique (fonte ou fer) par centimètre carré dépend seulement du rapport de sa hauteur à son diamètre. Si ce rapport est constant, la charge par centimètre carré est la même. Par conséquent, si l'on double les dimensions d'une colonne (hauteurs et diamètres) la charge par centimètre carré restant la même, la charge totale a quadruplé comme la section transversale. On peut vérifier cette loi dans les tableaux suivants, en comparant les charges de deux colonnes, soit en fonte, soit en fer, dont les dimensions, hauteurs et diamètres sont dans le rapport de 1 à 2. Cette loi permettrait de déterminer la charge d'une colonne dont les dimensions, hauteurs et diamètres dépasseraient la limite du tableau.

Cette loi est applicable aux colonnes creuses dont les dimensions, hauteurs, diamètres et épaisseurs sont dans le même rapport.

(Voir n° 389 *les formules donnant les charges de compression des supports en fonte et en fer de diverses formes.*)

Tableau des charges totales P *qu'on peut faire supporter en toute sécurité aux colonnes en fonte et en fer de* l *centimètres de hauteur, et de* d *centimètres de diamètre ou* s *centimètres carrés de section. Ces charges ont été calculées à l'aide des formules* (a') *et* (a'_1).

d diamètres, *s* sections.	Hauteurs *l*.	CHARGES P des colonnes en fonte	CHARGES P des colonnes en fer.
	cent.	kilog.	kilog.
d=5 *s*=19,63	100	8 770	6 730
	110	7 964	6 573
	120	7 236	6 408
	130	6 582	6 238
	140	5 996	6 065
	150	5 473	5 889
	160	5 007	5 712
	170	4 590	5 535
	180	4 218	5 359
	190	3 885	5 184
	200	3 586	5 012
	220	3 077	4 678
	240	2 663	4 359
	260	2 323	4 059
	280	2 042	3 777
	300	1 807	3 516
	325	1 564	3 216
	350	1 366	2 945
	375	1 202	2 700
	400	1 066	2 480
d=6 *s*=28,27	100	14 810	10 043
	125	12 133	9 599
	150	9 937	9 107
	175	8 186	8 587
	200	6 803	8 056
	225	5 710	7 528
	250	4 840	7 015
	275	4 143	6 523
	300	3 578	6 058
	325	3 117	5 622
	350	2 742	5 217
	375	2 418	4 842
	400	2 151	4 497
d=7 *s*=38,48	100	22 500	13 975
	125	19 054	13 506
	150	16 047	12 974
	175	13 525	12 396
	200	11 450	11 791
	225	9 753	11 172
	250	8 368	10 553
	275	7 232	9 944
	300	6 296	9 354
	325	5 520	8 787
	350	4 871	8 246
	375	4 325	7 735
	400	3 862	7 254
	425	3 467	6 804
	450	3 128	6 384
d=8 *s*=50,26	100	31 785	18 522
	125	27 643	18 035
	150	23 844	17 474
	175	20 514	16 855
	200	17 666	16 191
	225	15 265	15 500
	250	13 252	14 795
	275	11 566	14 086
	300	10 151	13 384
	325	8 960	12 697
	350	7 952	12 028

d diamètres, *s* sections.	Hauteurs *l*.	CHARGES P des colonnes en fonte	CHARGES P des colonnes en fer.
	cent.	kilog.	kilog.
d=8 *s*=50,26 (*suite.*)	375	7 095	11 386
	400	6 362	10 770
	425	5 732	10 184
	450	5 187	9 628
	475	4 713	9 103
	500	4 299	8 608
d=9 *s*=63,61	100	42 610	23 680
	125	37 861	23 181
	150	33 322	22 598
	175	29 189	21 947
	200	25 532	21 240
	225	22 358	20 492
	250	19 631	19 716
	275	17 299	18 924
	300	15 307	18 126
	325	13 605	17 332
	350	12 145	16 549
	375	10 892	15 784
	400	9 808	15 040
	425	8 869	14 321
	450	8 052	13 631
	475	7 337	12 969
	500	6 709	12 339
	525	6 155	11 738
	550	5 665	11 169
d=10 *s*=78,54	150	44 468	28 345
	175	39 554	27 669
	200	35 088	26 928
	225	31 106	26 135
	250	27 606	25 302
	275	24 552	24 440
	300	21 900	23 562
	325	19 597	22 676
	350	17 599	21 792
	375	15 863	20 915
	400	14 349	20 053
	425	13 026	19 210
	450	11 865	18 390
	475	10 844	17 596
	500	9 942	16 830
	525	9 142	16 094
	550	8 431	15 387
	575	7 797	14 712
	600	7 228	14 067
d=11 *s*=95,03	150	57 202	34 704
	175	51 603	34 012
	200	46 327	33 241
	225	41 534	32 411
	250	37 229	31 532
	275	33 403	30 614
	300	30 022	29 667
	325	27 048	28 703
	350	24 433	27 730
	375	22 135	26 755
	400	20 112	25 786
	425	18 330	24 829
	450	16 755	23 889
	475	15 359	22 969
	500	14 120	22 074

d diamètres, *s* sections.	Hauteurs *l*.	CHARGES P des colonnes en fonte	CHARGES P des colonnes en fer.
	cent.	kilog.	kilog.
d=11 *s*=95,03 (*suite.*)	525	13 016	21 205
	550	12 029	20 364
	575	11 145	19 552
	600	10 351	18 771
	625	9 635	18 020
	650	8 987	17 300
d=12 *s*=113,09	200	59 243	40 176
	225	53 652	39 323
	250	48 533	38 400
	275	43 903	37 435
	300	39 751	36 432
	325	36 044	35 401
	350	32 746	34 350
	375	29 817	33 290
	400	27 214	32 226
	425	24 900	31 166
	450	22 841	30 115
	475	21 004	29 079
	500	19 363	28 061
	525	17 893	27 066
	550	16 574	26 094
	575	15 386	25 150
	600	14 315	24 234
	625	13 346	23 347
	650	12 469	22 491
	675	11 718	21 665
	700	10 944	20 869
d=13 *s*=132,73	200	73 815	47 735
	225	67 460	46 852
	250	61 533	45 903
	275	56 090	44 898
	300	51 133	43 847
	325	46 653	42 759
	350	42 621	41 643
	575	39 000	40 507
	400	35 753	39 359
	425	32 842	38 207
	450	30 232	37 056
	475	27 888	35 913
	500	25 782	34 782
	525	23 885	33 667
	550	22 174	32 572
	575	20 628	31 500
	600	19 228	30 453
	625	17 957	29 433
	650	16 801	28 442
	675	15 748	27 480
	700	14 786	26 549
d=14 *s*=153,93	250	76 215	54 028
	275	69 961	52 990
	300	64 191	51 898
	325	58 912	50 762
	350	54 106	49 588
	375	49 746	48 387
	400	45 803	47 166
	425	42 236	45 932
	450	39 015	44 691
	475	36 103	43 451
	500	33 472	42 216

d diamètres, *s* sections.	Hauteurs *l*.	CHARGES P des colonnes en fonte	CHARGES P des colonnes en fer.
	cent.	kilog.	kilog.
d=14 s=153,93 (*suite.*)	525	31 089	40 991
	550	28 929	39 780
	575	26 969	38 588
	600	25 186	37 417
	625	23 561	36 269
	650	22 080	35 146
	675	20 725	34 052
	700	19 485	32 985
	725	18 347	31 948
	750	17 301	30 942
d=15 s=176,71	275	85 526	61 713
	300	78 945	60 586
	325	72 850	59 407
	350	67 247	58 185
	375	62 112	56 927
	400	57 426	55 640
	425	53 158	54 334
	450	49 272	53 013
	475	45 738	51 685
	500	42 524	50 356
	525	39 598	49 029
	550	36 932	47 711
	575	34 503	46 407
	600	32 284	45 117
	625	30 255	43 847
	650	28 399	42 600
	675	26 696	41 376
	700	25 132	40 178
	725	23 694	39 009
	750	22 368	37 866
	775	21 145	36 755
	800	20 015	35 673
d=16 s=201,06	300	95 337	69 902
	325	88 479	68 687
	350	82 063	67 422
	375	76 131	66 114
	400	70 670	64 771
	425	65 658	63 400
	450	61 064	62 007
	475	56 860	60 601
	500	53 011	59 185
	525	49 490	57 767
	550	46 267	56 350
	575	43 314	54 941
	600	40 608	53 542
	625	38 125	52 157
	650	35 843	50 790
	675	33 744	49 443
	700	31 812	48 119
	725	30 029	46 820
	750	28 383	45 547
	775	26 86[illegible]	44 301
	800	25 451	43 084
d=17 s=226,98	300	113 513	79 842
	325	105 801	[illegible]8 596
	350	98 570	77 295
	375	91 826	75 943
	400	85 570	74 550
	425	79 781	73 121
	450	74 547	71 664
	475	69 523	70 187
	500	64 996	68 693
	525	60 833	67 192
	550	57 003	65 685
	575	53 478	64 178
d=17 s=226,98 (*suite.*)	600	50 235	62 678
	625	47 247	61 185
	650	44 494	59 706
	675	41 953	58 243
	700	39 606	56 799
	725	37 435	55 375
	750	35 424	53 974
	775	33 562	52 600
	800	31 833	51 251
	825	30 227	49 931
	850	28 732	48 639
d=18 s=254,46	325	124 799	89 127
	350	116 763	87 794
	375	109 207	86 404
	400	102 137	84 966
	425	95 555	83 487
	450	89 440	81 974
	475	83 775	80 432
	500	78 531	78 869
	525	73 681	77 290
	550	69 201	75 701
	575	65 062	74 107
	600	61 234	72 511
	625	57 697	70 919
	650	54 423	69 335
	675	51 393	67 762
	700	48 475	66 203
	725	45 983	64 661
	750	43 567	63 140
	775	41 322	61 640
	800	39 236	60 165
	825	37 293	58 714
	850	35 480	57 289
	875	33 790	55 895
	900	32 210	54 527
d=19 s=283,52	350	136 644	98 921
	375	128 274	97 498
	400	120 307	96 021
	425	113 007	94 498
	450	106 098	92 934
	475	99 654	91 335
	500	93 662	89 709
	525	88 096	88 062
	550	82 924	86 397
	575	78 124	84 720
	600	73 669	83 037
	625	69 537	81 353
	650	65 700	79 670
	675	62 139	77 995
	700	58 829	76 329
	725	55 751	74 675
	750	52 837	73 039
	775	50 221	71 420
	800	47 735	69 820
	825	45 414	68 244
	850	43 247	66 692
	875	41 222	65 166
	900	39 328	63 667
	925	37 553	62 196
	950	35 889	60 754
d=20 s=314,16	350	158 215	110 676
	375	149 044	109 224
	400	140 350	107 712
	425	132 142	106 148
	450	124 426	104 539
d=20 s=314,16 (*suite.*)	475	117 192	102 889
	500	110 424	101 206
	525	104 106	99 495
	550	98 209	97 761
	575	92 716	96 011
	600	87 598	94 248
	625	82 831	92 478
	650	78 389	90 705
	675	74 254	88 933
	700	70 399	87 166
	725	66 804	85 407
	750	63 450	83 660
	775	60 320	81 927
	800	57 395	80 211
	825	54 661	78 514
	850	52 103	76 839
	875	49 707	75 187
	900	47 461	73 559
	925	45 354	71 958
	950	43 375	70 384
	975	41 516	68 837
	1000	39 767	67 320
d=21 s=346,36	350	181 443	123 049
	375	171 493	121 569
	400	161 989	120 027
	425	152 970	118 428
	450	144 437	116 777
	475	136 391	115 082
	500	128 839	113 347
	525	121 742	111 579
	550	115 100	109 784
	575	108 874	107 964
	600	103 061	106 129
	625	97 619	104 279
	650	92 540	102 417
	675	87 787	100 560
	700	83 349	98 699
	725	79 198	96 841
	750	75 317	94 991
	775	71 682	93 150
	800	68 282	91 323
	825	65 093	89 510
	850	62 106	87 718
	875	59 302	85 943
	900	56 670	84 192
	925	54 196	82 463
	950	51 871	80 760
	975	49 682	79 084
	1000	47 620	77 433
	1025	45 677	75 812
	1050	43 843	74 220
d=22 s=380,13	350	206 330	136 040
	375	195 608	134 538
	400	185 314	132 968
	425	175 492	131 337
	450	166 141	129 649
	475	157 286	127 912
	500	148 914	126 131
	525	141 031	124 311
	550	133 611	122 458
	575	126 612	120 578
	600	120 091	118 672
	625	113 953	116 752
	650	108 196	114 817
	675	102 793	112 871
	700	97 736	110 923

d diamètres, *s* sections.	Hauteurs *l*.	CHARGES P des colonnes en fonte	CHARGES P des colonnes en fer.
	cent.	kilog.	kilog.
d=22 *s*=380,13 (*suite*.)	725	92 989	108 971
	750	88 541	107 024
	775	84 368	105 082
	800	80 450	103 148
	825	76 774	101 228
	850	73 322	99 325
	875	70 073	97 430
	900	67 021	95 561
	925	64 147	93 709
	950	61 438	91 880
	975	58 887	90 077
	1000	56 480	88 297
	1025	54 210	86 544
	1050	52 065	84 822
	1075	50 035	83 125
	1100	48 118	81 456
d=23 *s*=415,47	350	232 850	149 649
	375	221 389	148 126
	400	210 322	146 531
	425	199 684	144 869
	450	189 500	143 150
	475	179 870	141 376
	500	170 689	139 553
	525	161 792	137 686
	550	153 782	135 781
	575	146 033	133 843
	600	138 734	131 881
	625	131 862	129 888
	650	125 395	127 880
	675	119 317	125 859
	700	113 601	123 827
	725	108 227	121 790
	750	103 176	119 751
	775	98 432	117 715
	800	93 960	115 680
	825	89 758	113 655
	850	85 804	111 642
	875	82 079	109 641
	900	78 568	107 655
	925	75 259	105 686
	950	72 137	103 738
	975	69 191	101 810
	1000	66 408	99 906
	1025	63 778	98 026
	1050	61 290	96 175
	1075	58 936	94 343
	1100	56 707	92 543
	1125	54 594	90 773
	1150	52 591	89 029
d=24 *s*=452,38	350	260 983	163 872
	375	248 807	162 331
	400	236 986	160 714
	425	225 578	159 028
	450	214 618	157 278
	475	204 135	155 471
	500	194 141	153 609
	525	184 639	151 698
	550	175 619	149 746
	575	167 088	147 757
	600	159 007	145 733
	625	151 379	143 682
	650	144 184	141 609
	675	137 395	139 515
	700	130 994	137 407
	725	124 959	135 290
	750	119 273	133 165
	775	113 913	131 037
d=24 *s*=452,38 (*suite*.)	800	108 862	128 911
	825	104 099	126 787
	850	99 606	124 670
	875	95 368	122 563
	900	91 366	120 467
	925	87 589	118 386
	950	84 021	116 322
	975	80 646	114 276
	1000	77 455	112 251
	1025	74 436	110 247
	1050	71 575	108 267
	1075	68 866	106 311
	1100	66 298	104 381
	1125	63 861	102 480
	1150	61 548	100 603
	1175	59 351	98 755
	1200	57 263	96 939
d=25 *s*=490,87	350	290 728	178 715
	375	277 861	177 156
	400	265 310	175 520
	425	253 137	173 811
	450	241 389	172 034
	475	230 101	170 195
	500	219 295	168 298
	525	208 973	166 350
	550	199 146	164 354
	575	189 807	162 316
	600	180 940	160 241
	625	172 535	158 133
	650	164 585	155 997
	675	157 060	153 838
	700	149 944	151 659
	725	143 221	149 466
	750	136 870	147 261
	775	130 868	145 049
	800	125 199	142 833
	825	119 844	140 617
	850	114 781	138 403
	875	109 996	136 195
	900	105 473	133 995
	925	101 194	131 807
	950	97 144	129 631
	975	93 310	127 471
	1000	89 680	125 329
	1025	86 239	123 205
	1050	82 977	121 103
	1075	79 883	119 023
	1100	76 946	116 967
	1125	74 157	114 935
	1150	71 506	112 930
	1175	68 987	110 952
	1200	66 589	109 001
	1225	64 308	107 080
	1250	62 135	105 187
d=26 *s*=530,93	350	322 060	194 171
	375	308 531	192 597
	400	295 285	190 944
	425	282 356	189 212
	450	269 836	187 411
	475	257 753	185 545
	500	246 138	183 616
	525	235 008	181 633
	550	224 354	179 596
	575	214 209	177 514
	600	204 537	175 391
	625	195 344	173 231
	650	186 616	171 038
d=26 *s*=530,93 (*suite*.)	675	178 337	168 817
	700	170 489	166 573
	725	163 050	164 309
	750	156 002	162 030
	775	149 332	159 738
	800	143 015	157 439
	825	137 033	155 135
	850	131 372	152 830
	875	126 009	150 527
	900	120 930	148 228
	925	116 116	145 936
	950	111 555	143 654
	975	107 234	141 385
	1000	103 130	139 130
	1025	99 238	136 891
	1050	95 543	134 671
	1075	92 035	132 470
	1100	88 700	130 291
	1125	85 530	128 135
	1150	82 515	126 003
	1175	79 646	123 896
	1200	76 913	121 815
	1225	74 311	119 763
	1250	71 830	117 736
	1275	69 464	115 738
	1300	67 206	113 771
d=27 *s*=572,55	350	354 953	210 236
	375	340 791	208 649
	400	326 849	206 978
	425	313 213	205 229
	450	299 939	203 406
	475	287 094	201 513
	500	274 662	199 556
	525	262 724	197 540
	550	251 250	195 467
	575	240 293	193 345
	600	229 814	191 178
	625	219 829	188 969
	650	210 305	186 723
	675	201 245	184 446
	700	192 638	182 140
	725	184 460	179 810
	750	176 700	177 462
	775	169 330	175 096
	800	162 339	172 718
	825	155 706	170 333
	850	149 413	167 941
	875	143 444	165 547
	900	137 781	163 155
	925	132 402	160 765
	950	127 299	158 382
	975	122 455	156 007
	1000	117 851	153 645
	1025	113 479	151 295
	1050	109 322	148 961
	1075	105 369	146 644
	1100	101 610	144 346
	1125	98 030	142 068
	1150	94 622	139 813
	1175	91 376	137 581
	1200	88 282	135 373
	1225	85 332	133 190
	1250	82 518	131 033
	1275	79 832	128 904
	1300	77 267	126 806
	1325	74 817	124 734
	1350	72 475	122 689

d diamètres, *s* sections.	Hauteurs *l*.	CHARGES P des colonnes en fonte.	CHARGES P des colonnes en fer.
	cent.	kilog.	kilog.
d=28 *s*=615,75	350	389 410	226 918
	375	374 640	225 318
	400	360 045	223 632
	425	345 708	221 865
	450	331 699	220 028
	475	318 074	218 106
	500	304 875	216 123
	525	292 124	214 077
	550	279 856	211 972
	575	268 072	209 812
	600	256 776	207 604
	625	245 977	205 350
	650	235 660	203 056
	675	225 814	200 725
	700	216 429	198 362
	725	207 496	195 972
	750	198 994	193 557
	775	190 904	191 123
	800	183 215	188 672
	825	175 901	186 208
	850	168 954	183 735
	875	162 347	181 256
	900	156 066	178 773
	925	150 098	176 290
	950	144 423	173 811
	975	139 028	171 338
	1000	133 894	168 871
	1025	129 010	166 416
	1050	124 362	163 972
	1075	119 938	161 543
	1100	115 723	159 130
	1125	111 706	156 735
	1150	107 879	154 360
	1175	104 229	152 006
	1200	100 747	149 674
	1225	97 424	147 366
	1250	94 252	145 082
	1275	91 220	142 824
	1300	88 324	140 593
	1325	85 554	138 391
	1350	82 905	136 213
	1375	80 370	134 063
	1400	77 943	131 946
d=29 *s*=660,52	350	425 400	244 211
	375	410 057	242 600
	400	394 834	240 901
	425	379 824	239 119
	450	365 103	237 257
	475	350 732	235 321
	500	336 761	233 313
	525	323 226	231 240
	550	310 138	229 103
	575	297 553	226 910
	600	285 435	224 663
	625	273 820	222 367
	650	262 695	220 028
	675	252 045	217 649
	700	241 878	215 233
	725	232 165	212 785
	750	222 908	210 310
	775	214 076	207 810
	800	205 662	205 290
	825	197 647	202 753
	850	190 019	200 203
	875	182 747	197 643
	900	175 827	195 077
	925	169 232	192 506
d=29 *s*=660,52 (*suite.*)	950	162 966	189 936
	975	156 989	187 366
	1000	151 298	184 801
	1025	145 875	182 243
	1050	140 706	179 695
	1075	135 780	177 158
	1100	131 085	174 634
	1125	126 604	172 126
	1150	122 328	169 635
	1175	118 249	167 162
	1200	114 351	164 709
	1225	110 629	162 279
	1250	107 073	159 871
	1275	103 671	157 487
	1300	100 418	155 127
	1325	97 307	152 794
	1350	94 328	150 489
	1375	91 475	148 209
	1400	88 741	145 955
	1425	86 122	143 732
	1450	83 610	141 540
d=30 *s*=706,85	350	462 913	262 111
	375	447 020	260 490
	400	431 193	258 779
	425	415 532	256 982
	450	400 119	255 104
	475	385 021	253 147
	500	370 293	251 118
	525	355 980	249 021
	550	342 108	246 854
	575	328 706	244 630
	600	315 784	242 349
	625	303 349	240 015
	650	291 412	237 634
	675	279 954	235 208
	700	268 985	232 744
	725	258 488	230 243
	750	248 450	227 710
	775	238 865	225 150
	800	229 712	222 565
	825	220 968	219 960
	850	212 630	217 337
	875	204 680	214 701
	900	197 092	212 055
	925	189 858	209 401
	950	182 955	206 743
	975	176 374	204 084
	1000	170 099	201 424
	1025	164 109	198 769
	1050	158 396	196 120
	1075	152 939	193 480
	1100	147 733	190 850
	1125	142 761	188 232
	1150	138 013	185 629
	1175	133 475	183 041
	1200	129 138	180 472
	1225	124 991	177 922
	1250	121 024	175 393
	1275	117 228	172 886
	1300	113 596	170 401
	1325	110 116	167 941
	1350	106 785	165 506
	1375	103 591	163 097
	1400	100 529	160 715
	1425	97 592	158 361
	1450	94 775	156 032
	1475	92 071	153 735
	1500	89 475	151 468
d=31 *s*=754,76	350	501 942	
	400	469 121	
	450	436 762	
	500	405 489	
	550	375 756	
	600	347 829	
	650	321 821	
	700	297 769	
	750	275 683	
	800	255 373	
	850	236 828	
	900	219 888	
	950	204 431	
	1000	190 327	
	1050	177 457	
	1100	165 709	
	1150	154 969	
	1200	145 151	
	1250	136 152	
	1300	127 898	
	1350	120 318	
	1400	114 212	
	1450	106 966	
	1500	101 010	
	1550	95 539	
d=32 *s*=804,24	350	542 482	
	400	508 611	
	450	474 998	
	500	442 328	
	550	411 076	
	600	381 547	
	650	353 917	
	700	328 251	
	750	304 526	
	800	282 685	
	850	262 632	
	900	244 260	
	950	227 438	
	1000	212 044	
	1050	197 960	
	1100	185 067	
	1150	173 256	
	1200	162 431	
	1250	152 498	
	1300	143 372	
	1350	134 978	
	1400	127 247	
	1450	120 116	
	1500	113 532	
	1550	107 442	
	1600	101 802	
d=33 *s*=855,29	350	584 505	
	400	549 636	
	450	514 826	
	500	480 794	
	550	448 057	
	600	416 971	
	650	387 711	
	700	360 407	
	750	335 071	
	800	311 649	
	850	290 063	
	900	270 210	
	950	251 977	
	1000	235 249	
	1050	219 901	

d diamèt. s sect.	Hauteurs l.	CHARGES P des colonnes en fonte.
	cent.	kilog.
$d = 33$, $s = 855{,}29$ (suite.)	1100	205820
	1150	192890
	1200	181015
	1250	170097
	1300	160052
	1350	150794
	1400	142256
	1450	134371
	1500	127082
	1550	120332
	1600	114074
	1650	108265
$d = 34$, $s = 907{,}92$	350	628019
	400	592192
	450	556234
	500	520881
	550	486693
	600	454051
	650	423202
	700	394268
	750	367305
	800	342167
	850	319124
	900	297772
	950	278094
	1000	259988
	1050	243332
	1100	228011
	1150	213914
	1200	200942
	1250	188993
	1300	177976
	1350	167810
	1400	158421
	1450	149737
	1500	141698
	1550	134246
	1600	127331
	1650	120905
	1700	114927
$d = 35$, $s = 962{,}11$	350	672992
	400	636255
	450	599198
	500	562584
	550	526969
	600	492810
	650	460375
	700	429818
	750	401213
	800	374572
	850	349848
	900	326955
	950	305797
	1000	286274
	1050	268266
	1100	251666
	1150	236358
	1200	222237
	1250	209201
	1300	197180
	1350	186060
	1400	175773
	1450	166248
	1500	157417
	1550	149224
	1600	141610
	1650	134528
	1700	127933
	1750	121786
$d = 36$, $s = 1017{,}87$	350	719428
	400	681835
	450	643713
	500	605852
	550	568871
	600	533227
	650	499230
	700	467067
	750	436824
	800	408560
	850	382232
	900	357770
	950	335108
	1000	313669
	1050	294741
	1100	276812
	1150	260250
	1200	244944
	1250	230789
	1300	217687
	1350	205577
	1400	194351
	1450	183941
	1500	174276
	1550	165297
	1600	156947
	1650	149173
	1700	141924
	1750	135162
	1800	128844
$d = 37$, $s = 1075{,}21$	350	767327
	400	728549
	450	689771
	500	650724
	550	612404
	600	575301
	650	539764
	700	505991
	750	474128
	800	444228
	850	416296
	900	390248
	950	366056
	1000	343588
	1050	322770
	1100	303485
	1150	285626
	1200	269082
	1250	253764
	1300	239566
	1350	226402
	1400	214192
	1450	202851
	1500	192312
	1550	182509
	1600	173381
	1650	164873
	1700	156934
	1750	149521
	1800	142590
	1850	136103
$d = 38$, $s = 1134{,}11$	350	816671
	400	777472
	450	737365
	500	697165
	550	657546
$d = 38$, $s = 1154{,}11$ (suite).	600	619018
	650	581951
	700	546596
	750	513121
	800	481604
	850	452028
	900	424395
	950	398631
	1000	374663
	1050	352386
	1100	331700
	1150	312506
	1200	294687
	1250	278156
	1300	262815
	1350	248567
	1400	235326
	1450	223013
	1500	211558
	1550	200889
	1600	190942
	1650	181662
	1700	172996
	1750	164897
	1800	157316
	1850	150216
	1900	143560
$d = 39$, $s = 1194{,}59$	350	867445
	400	827508
	450	786465
	500	745162
	550	704278
	600	664361
	650	625804
	700	588886
	750	553810
	800	520655
	850	489458
	900	460208
	950	432873
	1000	407387
	1050	383600
	1100	361480
	1150	340906
	1200	321784
	1250	303998
	1300	287471
	1350	272091
	1400	257779
	1450	244456
	1500	232042
	1550	220461
	1600	209662
	1650	199575
	1700	190144
	1750	181319
	1800	173055
	1850	165309
	1900	158040
	1950	151214
$d = 40$, $s = 1256{,}63$	350	919654
	400	879008
	450	837075
	500	794708
	550	752603
	600	711327
$d = 40$, $s = 1256{,}63$ (suite.)	650	671308
	700	632856
	750	596170
	800	561397
	850	528564
	900	497699
	950	468766
	1000	441692
	1050	416423
	1100	392834
	1150	370862
	1200	350388
	1250	331320
	1300	313555
	1350	297008
	1400	281594
	1450	267214
	1500	253799
	1550	241277
	1600	229580
	1650	218642
	1700	208410
	1750	198824
	1800	189842
	1850	181414
	1900	173499
	1950	166063
	2000	159067
$d = 41$, $s = 1320{,}25$	350	973303
	400	931980
	450	889197
	500	846232
	550	802510
	600	759914
	650	718464
	700	678493
	750	640227
	800	603847
	850	569387
	900	536897
	950	506340
	1000	477687
	1050	450868
	1100	425799
	1150	402388
	1200	380528
	1250	360142
	1300	341115
	1350	323356
	1400	306789
	1450	291317
	1500	276866
	1550	263359
	1600	250724
	1650	238898
	1700	227827
	1750	217447
	1800	207707
	1850	198562
	1900	189971
	1950	181891
	2000	174286
	2050	167120
$d = 42$, $s = 1385{,}44$	350	1028361
	400	936404
	450	942804
	500	898418
	550	853987
$d = 42$, $s = 1385{,}44$ (suite.)	600	810104
	650	767247
	700	725784
	750	685970
	800	647959
	850	611878
	900	577748
	950	545586
	1000	515355
	1050	486967
	1100	460389
	1150	435498
	1200	412235
	1250	390485
	1300	370153
	1350	351150
	1400	333397
	1450	316791
	1500	301261
	1550	286731
	1600	273124
	1650	260378
	1700	248422
	1750	237210
	1800	226681
	1850	216787
	1900	207483
	1950	198726
	2000	190481
	2050	182706
	2100	175372
$d = 43$, $s = 1452{,}20$	350	1084841
	400	1042277
	450	997894
	500	952562
	550	907022
	600	861885
	650	817661
	700	774728
	750	733369
	800	693770
	850	656083
	900	620323
	950	586530
	1000	554681
	1050	524730
	1100	496608
	1150	470223
	1200	445504
	1250	422367
	1300	400700
	1350	380420
	1400	361433
	1450	343667
	1500	327019
	1550	311428
	1600	296813
	1650	283102
	1700	270235
	1750	258152
	1800	246798
	1850	236118
	1900	226070
	1950	216604
	2000	207685
	2050	199270
	2100	191327
	2150	183823

d diamèt. *s* sect.	Hauteurs *l*.	CHARGES P des colonnes en fonte.
	cent.	kilog.
$d = 44$, $s = 1520,52$	350	1142739
	400	1099589
	450	1054458
	500	1008206
	550	961595
	600	915248
	650	869683
	700	825311
	750	782437
	800	741254
	850	701943
	900	664563
	950	629146
	1000	595684
	1050	564142
	1100	534446
	1150	506556
	1200	480375
	1250	455813
	1300	432772
	1350	411182
	1400	390935
	1450	371962
	1500	354163
	1550	337473
	1600	321806
	1650	307096
	1700	293283
	1750	280295
	1800	268078
	1850	256584
	1900	245756
	1950	235550
	2000	225924
	2050	216838
	2100	208259
	2150	200144
	2200	192471
$d = 45$, $s = 1590,43$	350	1202052
	400	1158348
	450	1112500
	500	1065372
	550	1017722
	600	970196
	650	923329
	700	877543
	750	833171
	800	790441
	850	749524
	900	710521
	950	673477
	1000	638378
	1050	605223
	1100	573964
	1150	544534
	1200	516857
	1250	490837
	1300	466402
$d = 45$, $s = 1590,43$ (*suite.*)	1350	443461
	1400	421927
	1450	401705
	1500	382727
	1550	364898
	1600	348149
	1650	332403
	1700	317603
	1750	303675
	1800	290564
	1850	278215
	1900	266572
	1950	255594
	2000	245231
	2050	235444
	2100	226194
	2150	217443
	2200	209164
	2250	201320
$d = 46$, $s = 1661,90$	350	1262765
	400	1218531
	450	1172000
	500	1124006
	550	1075352
	600	1026726
	650	978583
	700	931412
	750	885564
	800	841298
	850	798806
	900	758166
	950	719487
	1000	682763
	1050	647985
	1100	615136
	1150	584156
	1200	554943
	1250	527453
	1300	501587
	1350	477272
	1400	454409
	1450	432913
	1500	412710
	1550	393711
	1600	375846
	1650	359035
	1700	343209
	1750	328320
	1800	314278
	1850	301038
	1900	288552
	1950	276766
	2000	265635
	2050	255112
	2100	245164
	2150	235747
	2200	226830
	2250	218379
	2300	210367
$d = 47$, $s = 1734,94$	350	1324883
	400	1280141
	450	1232951
	500	1184162
	550	1134547
	600	1084766
	650	1035384
	700	986871
	750	939555
	800	893794
	850	849727
	900	807490
	950	767184
	1000	728819
	1050	692425
	1100	657972
	1150	625411
	1200	594695
	1250	565687
	1300	538373
	1350	512641
	1400	488429
	1450	465631
	1500	444191
	1550	423967
	1600	404943
	1650	387028
	1700	370150
	1750	354237
	1800	339232
	1850	325075
	1900	311712
	1950	299086
	2000	287154
	2050	275871
	2100	265199
	2150	255072
	2200	245497
	2250	236414
	2300	227795
	2350	219613
$d = 48$, $s = 1809,55$	350	1388389
	400	1343170
	450	1295356
	500	1245787
	550	1195237
	600	1144381
	650	1093791
	700	1043950
	750	995243
	800	947960
	850	902321
	900	858485
	950	816555
	1000	776578
	1050	738568
	1100	702509
	1150	668342
$d = 48$, $s = 1809,55$ (*suite.*)	1200	636037
	1250	605541
	1300	576745
	1350	549588
	1400	523985
	1450	499843
	1500	477101
	1550	455659
	1600	435457
	1650	416402
	1700	398432
	1750	381478
	1800	365471
	1850	350362
	1900	336088
	1950	322590
	2000	309825
	2050	297745
	2100	286307
	2150	275470
	2200	265196
	2250	255448
	2300	246197
	2350	237409
	2400	229057
$d = 49$, $s = 1885,74$	350	1453310
	400	1407630
	450	1359210
	500	1308887
	550	1257441
	600	1205537
	650	1153775
	700	1102643
	750	1052550
	800	1003783
	850	956657
	900	911197
	950	867661
	1000	826035
	1050	786380
	1100	748714
	1150	712956
	1200	679066
	1250	647024
	1300	616723
	1350	588117
	1400	561098
	1450	535600
	1500	511529
	1550	488827
	1600	467397
	1650	447171
	1700	428079
	1750	410050
	1800	393020
	1850	376919
	1900	361702
	1950	347302
$d = 49$, $s = 1885,74$ (*suite.*)	2000	333674
	2050	320770
	2100	308539
	2150	296944
	2200	285950
	2250	275512
	2300	265606
	2350	256178
	2400	247223
	2450	238701
$d = 50$, $s = 1963,49$	350	1519605
	400	1473490
	450	1424495
	500	1373454
	550	1321133
	600	1268221
	650	1215313
	700	1162918
	750	1111451
	800	1061245
	850	1012555
	900	965562
	950	920409
	1000	877185
	1050	835898
	1100	796586
	1150	759230
	1200	723766
	1250	690145
	1300	658341
	1350	628244
	1400	599781
	1450	572887
	1500	547482
	1550	523474
	1600	500798
	1650	479377
	1700	459128
	1750	439938
	1800	421893
	1850	404777
	1900	388576
	1950	373242
	2000	358720
	2050	344956
	2100	331908
	2150	319533
	2200	307784
	2250	296628
	2300	286026
	2350	275948
	2400	266359
	2450	257233
	2500	248543

389. Formules donnant les charges de compression des supports en fonte et en fer de diverses formes. Comme il a été dit page 442, les expériences d'Hodgkinson, déjà anciennes, ont servi de base aux formules de M. Love. Il est utile de rappeler que les expériences d'Hodgkinson ont été faites sur de très petits échantillons, dont le diamètre

variait de 1 centimètre à 1 centimètre 1/3 et la longueur de 2 centimètres à $1^m,54$.

On pouvait craindre que les formules déduites de pareilles expériences ne fussent pas applicables à de grandes dimensions. Aussi, dans ces dernières années (en 1881), des ingénieurs américains ont fait une série d'expériences sur des supports métalliques en tôle de diverses formes, dont quelques-uns mesuraient $0^m,35$ de diamètre. Ces expériences très variées ont permis de constater que la formule de Rankine, un peu différente des formules françaises, donne des valeurs acceptables pour les applications. Cette formule est la suivante :

$$P = \frac{f\omega}{1 + \frac{al^2}{r^2}} \qquad (1)$$

dans laquelle :

P est la charge exprimée en livres que peut porter la colonne avant la flexion;
f la charge d'écrasement d'un pilier court;
l longueur du pilier;
r rayon de gyration de la section transversale (*Int.* 1825);
a coefficient qui dépend de la manière d'assujettir les extrémités de la colonne ou du support;

Colonne avec embases plates, $a = \frac{1}{36000}$;

Colonne avec embase plate à une extrémité, l'autre extrémité étant libre $a = \frac{2}{36000}$;

Colonne dont les deux bouts sont arrondis $= \frac{4}{36000}$.

Comme on le voit, Rankine tient compte dans sa formule de l'encastrement des piliers, circonstance entièrement négligee dans les anciennes expériences d'Hodgkinson et dans les formules de M. Love, qui en sont l'interprétation. En 1858, Bélanger a publié pour un solide chargé debout une formule théorique qui exprime la plus petite force N capable de produire la flexion d'une telle pièce. Voici cette formule qui est reproduite dans un grand nombre d'ouvrages :

$$N = \frac{i^2\pi^2 EI}{l^2} \qquad (2)$$

dans laquelle :

l = longueur de la pièce;
I = moment d'inertie de la section transversale, pris par rapport à un axe perpendiculaire au sens dans lequel le solide a le plus de chance de fléchir. C'est le minimum du moment d'inertie que peut donner la section transversale *rapporté à son centre de gravité;*
E module d'élasticité de la matière;
i est pris égal à 1, 2, 3, etc., suivant que la pièce s'est infléchie une fois, deux fois, trois fois, etc.

Afin de donner à la formule précédente (2) une interprétation pratique on admet qu'il n'y a qu'une seule inflexion, si les extrémités de la pièce soumise à la compression sont arrondies: ce qui leur permet de tourner; la pièce se courbe, et dans ce cas on fait $i = 1$ dans la formule précédente.

Il y a double inflexion lorsque les deux extrémités du support sont fortement maintenues par une embase, comme cela se présente le plus souvent pour les colonnes en fonte et les piliers en tôle. On dit alors qu'il y a double encastrement et, pour ce cas, on fait $i = 2$ dans la formule précédente. On admet aussi que l'encastrement est réalisé lorsque les deux extrémités du support sont bien dressées. Si l'une des extrémités est arrondie et l'autre encastrée, le support se trouve dans un cas intermédiaire pour lequel on fait $i^2 = 2$.

On peut modifier la formule de Bélanger de manière à la rapprocher de celle de Rankine.

390. Modification de la formule de Bélanger. Dans la formule théorique (2) de Bélanger du numéro précédent, le module d'élasticité E est supposé constant; mais dans le cas d'un solide chargé debout, le module d'élasticité est susceptible de varier; aussi en partant de cette hypothèse M. P. Planat, dans son ouvrage (*Mécanique appliquée à la résistance des matériaux*) a remplacé, dans la formule (2) de Bélanger, la quantité E par la fonction hyperbolique :

$$E - \frac{BN}{\omega},$$

B étant une constante qui dépend de la charge N, et qui se détermine comme il sera dit ci-après.

En faisant cette substitution dans l'expression (2), elle devient successivement :

$$N = \frac{i^2\pi^2 I}{l^2}\left(E - \frac{BN}{\omega}\right)$$

ou

$$N = \frac{i^2\pi^2 EI}{l^2} - \frac{Bi^2\pi^2 IN}{l^2\omega}$$

$$N\left(1 + \frac{Bi^2\pi^2 I}{l^2\omega}\right) = \frac{EIi^2\pi^2}{l^2}$$

$$N\left(\frac{l^2}{Ii^2\pi^2} + \frac{B}{\omega}\right) = E$$

$$N = \frac{E}{\frac{B}{\omega} + \frac{l^2}{Ii^2\pi^2}}$$

en divisant par la section transversale ω, on obtient :

$$\frac{N}{\omega} = \frac{E}{B + \frac{l^2\omega}{Ii^2\pi^2}}.$$

Afin d'exprimer N en fonction du rapport $\frac{l}{h}$ de la longueur l de la pièce au plus petit côté h de sa section transversale, posons:

$$I = \theta\omega h^2,$$

θ étant un coefficient qui varie suivant la forme de la section. La dernière relation devient :

$$\frac{N}{\omega} = \frac{E}{B + \frac{l^2}{i^2\pi^2\theta h^2}}. \qquad (3)$$

Telle est l'expression de la plus petite force N capable de faire fléchir le solide soumis à la compression. Il reste à déterminer B en fonction de la charge de rupture d'un prisme de petite longueur par rapport à ses dimensions transversales.

391. Détermination du coefficient B pour les supports métalliques. Voici la marche indiquée par M. P. Planat pour calculer ce coefficient :

Pour des colonnes de petites hauteurs par rapport à leurs diamètres, le second terme du dénominateur dans l'expression ci-dessus est négligeable; mais alors $\frac{N}{\omega}$ est la charge de rupture par unité de section. Adoptons 7500 kilog. pour cette charge par centimètre carré d'un prisme de fonte de petite hauteur par rapport à ses dimensions transversales. La charge de rupture par mètre carré sera :

$$7500^k \times 10^4.$$

Si l'on prend pour la valeur moyenne du module d'élasticité de la fonte :

$$E = 9 \times 10^4,$$

ces diverses valeurs permettent d'écrire :

$$7500 \times 10^4 = \frac{9 \times 10^9}{B},$$

d'où

$$B = 120.$$

Pour le fer, on peut prendre :

$$E = 20 \times 10^9$$

et 3600 kilog. pour la charge de rupture par centimètre carré d'un prisme court ou 3600×10^4 par mètre carré. Un calcul analogue au précédent, fait pour la fonte, donne :

$$B = 555.$$

Pour des supports en fer, constitués au moyen de tôles et de cornières rivées, la charge de rupture peut être évaluée, moyennement, à 2500 kilog. par centimètre carré; dans ce cas, le calcul donne $B = 800$.

392. Applications des formules donnant la charge de compression d'un solide. Reprenons la formule (3) et appliquons-la pour la fonte :

$$\frac{N}{\omega} = \frac{E}{B + \frac{l^2}{i^2\pi^2\theta h^2}}. \qquad (3')$$

Admettons qu'il s'agisse d'une colonne en fonte pleine pour une section circulaire ω, de rayon r et de diamètre d, le moment d'inertie a pour valeur :

$$I = \frac{\pi r^4}{4} = \frac{\pi r^2}{4} r^2 = \frac{\omega}{4} \frac{d^2}{4}$$

ou

$$I = 0{,}0625 \omega d^2 = \theta \omega d^2,$$

en faisant dans la formule ci-dessus :

$$\theta = 0{,}0625$$
$$B = 120$$
$$E = 9 \times 10^9.$$

D'autre part, en prenant pour coefficient de sécurité le 1/6 de la charge de rupture 7500 kilog. par centimètre carré ou 1250 kilog. et $i = 2$, ce qui répond au double encastrement, on obtient pour la formule des colonnes pleines en fonte :

$$N = \frac{1250\omega}{1 + 0{,}003375 \left(\frac{l}{d}\right)^2} \qquad \text{(A)}$$

dans laquelle ω est la section exprimée en centimètres carrés et N la charge pratique en kilog.

Cette formule diffère de celle de M. Love (p. 442) en ce que l'unité remplace au dénominateur le terme 1,45. Elle donne des valeurs un peu plus grandes que celle de M. Love. On peut remarquer que pour de très petites valeurs du rapport $\frac{l}{d}$, la charge N pour 1 centimètre carré se rapproche de 1250 kilog. ; ce qui doit être.

Cas du non-encastrement. Il faut dans la formule générale (3') prendre $i = 1$; ce qui donne pour les colonnes non encastrées :

$$N = \frac{1250\omega}{1 + 0{,}0135 \left(\frac{l}{d}\right)^2}. \qquad \text{(B)}$$

392 bis. Bénéfice de l'encastrement des pièces soumises à la compression. Si l'on applique les deux formules (A) et (B) pour des colonnes de même diamètre, également chargées et de hauteur l et l', on en déduit :

$$0{,}003375 \left(\frac{l}{d}\right)^2 = 0{,}0135 \left(\frac{l'}{d}\right)^2,$$

d'où :

$$\frac{l}{l'} = 2,$$

c'est-à-dire que le bénéfice de l'encastrement se traduit ainsi :

La hauteur de la colonne doublement encastrée est double de celle non encastrée, à charge égale et à égalité de sécurité. Cette loi écono-

mique est applicable aux piliers et à tous les solides soumis à la compression, quelles que soient leurs sections (*).

Colonnes en fer pleines. En prenant

$$\theta = 0{,}0625 \text{ (pour un cercle)},$$
$$B = 555,$$
$$i = 2$$

et

$$\frac{3600^k}{6} = 600 \text{ kilog.}$$

pour le coefficient de sécurité par centimètre carré, on obtient la formule suivante, qui convient pour les colonnes encastrées :

$$N = \frac{600\omega}{1 + 0{,}00073 \left(\frac{l}{d}\right)^2}.$$

Si l'on fait $n = 1$, on obtient pour les colonnes non encastrées :

$$N = \frac{600\omega}{1 + 0{,}00292 \left(\frac{l}{d}\right)^2}.$$

(*Voir la note au bas de la page.*)

Les deux exemples précédents montrent la marche à suivre pour établir la formule générale donnant la charge pratique de compression d'un solide. Dans chaque cas particulier, il faudra déterminer le moment d'inertie minimum de la section transversale du profil. On pourrait, pour les cas les plus usuels, établir les moments d'inertie pour diverses catégories et diverses proportions de sections. Nous allons en donner quelques exemples.

393. Moment d'inertie d'un profil à double T, pris par rapport à son axe longitudinal. Les fers laminés à double T sont souvent employés pour constituer les arbalétriers des combles. Ces pièces supportent des efforts de compression qui tendent à les faire fléchir dans le sens des nervures des T, c'est-à-dire transversalement ou suivant leur plus petite dimension transversale. Pour leur appliquer la formule (3) (p. 455), il faut donc déterminer le minimum du moment d'inertie de leur section en le calculant par rapport à leur axe longitudinal. Mais vu la diversité des modèles des diverses usines et afin d'obtenir une formule applicable à un grand nombre de profils, nous établirons entre la hauteur, la largeur des fers et l'épaisseur des nervures des rapports simples qui peuvent être considérés comme des moyennes.

Admettons d'abord qu'il s'agisse de fers *à petites ailes*, présentant les proportions suivantes :

$$h = \frac{H}{3} \qquad e = \frac{1}{15} H \qquad a = \frac{H}{20}.$$

(*Voir les Profils*, page 460: *profil* n° 3.)

(*) Cette loi a été signalée par M. L.-A. Barré, en 1890, dans la *Semaine des Constructeurs* (n° 34, vol. 14). Elle résulte de ce que $i = 1$ pour les solides non encastrés et $i = 2$ pour les solides doublement encastrés.

Le moment d'inertie d'une telle section peut s'exprimer en fonction de la sectiou même ω et de la dimension h, sous la forme :

$$I = \theta \omega h^2 = 0{,}043\,\omega h^2, \qquad \text{(C)}$$

h étant le sens dans lequel la flexion du support a le plus de tendance à se produire.

Pour calculer le coefficient θ, on attribue à la section des dimensions présentant les proportions ci-dessus; on en calcule le moment d'inertie I et la section ω; par suite, la relation (C) donne :

$$\theta = \frac{I}{\omega h^2} = 0{,}043.$$

L'expression (C) permettra de calculer le moment d'inertie de tout profil semblable et *approximativement* de tout profil dont les proportions différeront peu des précédentes. Nous avons fait le même calcul pour un autre profil se rapportant à des fers *larges ailes*, présentant les proportions suivantes (*profil n°* 3, *page* 460) :

$$h = \frac{H}{2}$$

$$e = \frac{H}{12}$$

$$a = \frac{H}{20},$$

ce qui nous a donné :

$$I = 0{,}055\,\omega h^2.$$

Enfin, pour de forts échantillons de fers dont les nervures seraient très renforcées, nous avons fait le calcul avec les proportions suivantes (*profil n°* 3, *page* 460) :

$$h = \frac{2}{3}H, \quad e = \frac{H}{10}, \quad a = \frac{H}{15},$$

ce qui nous a donné :

$$I = 0{,}06\,\omega h^2.$$

Profils en croix. Ces supports soumis à la compression sont en fonte ou constitués soit par des fers cornières, soit par des tôles réunies au moyen d'équerres. Les nervures peuvent donc présenter divers épaisseurs; des épaisseurs minces pour la tôle et des épaisseurs plus grandes pour la fonte. En prenant les proportions suivantes (*voir le tableau*, p. 460) :

$$b = h$$

$$e = \frac{h}{10}.$$

On exprime le moment d'inertie sous la forme :

$$I = \theta \cdot \omega h^2 = 0{,}0438\,\omega h^2.$$

Pour des épaisseurs plus grandes et avec les proportions suivantes :

$$b = h$$
$$e = \frac{h}{8},$$

on trouve sensiblement la même valeur que ci-dessus :

$$I = 0{,}045\,\omega h^2.$$

Enfin, en prenant :

$$b = h$$
$$e = \frac{h}{6},$$

on obtient :

$$I = 0{,}0465\,\omega h^2.$$

Nous avons réuni dans le tableau suivant les valeurs du moment d'inertie de diverses sections de supports soumis à la compression.

Pour calculer un fer cornière isolé, soumis à la compression, il est nécessaire de déterminer son moment d'inertie minimum qui répond à un axe perpendiculaire à la bissectrice du profil. Si l'on réunit deux cornières, il faut prendre le moment d'inertie de l'ensemble par rapport à un axe parallèle au grand côté (voir les sections n°ˢ 7 et 8 du tableau page 461).

Ce tableau permettra d'établir la formule donnant la charge pratique de compression des solides ou supports dont les sections sont celles dudit tableau. Nous donnons (395) un exemple des calculs à effectuer.

Observations concernant les profils des pages 460 *et* 461. Dans le profil n° 2 (*forme caisson*), l'épaisseur est la même pour les côtés du caisson et prend les valeurs des cinq exemples indiqués au tableau page 460.

Les proportions du profil n° 3 (*fers à double T, symétriques*) se rapportent à peu près à des échantillons du commerce. Les valeurs de I sont, dans tous les cas, suffisamment approximatives pour l'objet qu'on se propose dans la question de la compression, pourvu que l'on tienne compte exactement des sections. Il serait du reste facile d'interpoler pour des proportions un peu différentes de celles du tableau. Cette observation est applicable à tous les profils à nervures des deux tableaux (n°ˢ 2, 3, 4, 6, 7 et 8).

Pour le profil n° 7 (*forme cornière*), la valeur du moment d'inertie I peut être prise par rapport à trois directions principales : 1° par rapport à un axe passant par le centre de gravité et parallèle à l'un des côtés; 2° par rapport à la bissectrice du profil; 3° par rapport à un axe passant par le centre de gravité et perpendiculaire à la bissectrice du profil. C'est ce dernier moment d'inertie qui est inscrit au tableau *page* 461, *profil n°* 7, parce qu'il est le minimum, c'est-à-dire que le solide a le plus de chance de fléchir suivant la bissectrice du profil. Le solide n° 8 a tendance à fléchir suivant la direction perpendiculaire au grand côté $2c$.

394. Types de solides (colonnes et piliers) soumis à la compression. Moments d'inertie (minimum) calculés par L.-A. Barré.

NUMÉROS	SECTIONS.	ÉPAISSEUR des nervures.	COEFFICIENT θ.	MOMENTS D'INERTIE I.	SURFACES des profils.
1	Fig. 106.	»	0,0833	$0{,}833\,\omega h^2$	bh
2		$e=\frac{b}{10}$	0,136	$0{,}136\,\omega h^2$	$bh-b'h'$
		$e=\frac{b}{15}$	0,146	$0{,}146\,\omega h^2$	*idem.*
		$e=\frac{b}{20}$	0,150	$0{,}150\,\omega h^2$	*id.*
		$e=\frac{b}{30}$	0,155	$0{,}155\,\omega h^2$	*id.*
		$e=\frac{b}{40}$	0,159	$0{,}159\,\omega h^2$	*id.*
3		$h=\frac{H}{3},\ e=\frac{H}{15},\ a=\frac{H}{20}$	0,043	$0{,}043\,\omega h^2=0{,}034\,h^4$	$\omega=0{,}088\,H^2$
		$h=\frac{H}{2},\ e=\frac{H}{12},\ a=\frac{H}{20}$	0,055	$0{,}055\,\omega h^2=0{,}0275\,h^4$	$\omega=0{,}125\,H^2$
		$h=\frac{2H}{3},\ e=\frac{H}{10},\ a=\frac{H}{15}$	0,060	$0{,}060\,\omega h^2=0{,}0223\,h^4$	$\omega=0{,}165\,H^2$
4		$e=\frac{h}{10}$	0,0438	$0{,}0438\,\omega h^2=0{,}0083\,h^4$	$bh-(b-e)(h-e$
		$e=\frac{h}{8}$	0,0450	$0{,}0450\,\omega h^2=0{,}0105\,h^4$	*id.*
		$e=\frac{h}{6}$	0,0465	$0{,}0465\,\omega h^2=0{,}0142\,h^4$	*id.*
		$e=\frac{h}{5}$	0,0477	$0{,}0477\,\omega h^2=0{,}0172\,h^4$	*id.*
		$e=\frac{h}{4}$	0,0498	$0{,}0498\,\omega h^2=0{,}0218\,h^4$	*id.*
5		»	$\frac{1}{24}=0{,}0416$	$0{,}0416\,\omega c^2=0{,}018\,c^4$	$\frac{c^2}{4}\sqrt{3}$
6		$e=\frac{c}{10}$	0,0594	$0{,}0594\,\omega c^2$	$\frac{\sqrt{3}}{4}(c^2-c'^2)$
		$e=\frac{c}{15}$	0,0674	$0{,}0674\,\omega c^2$	*id.*
		$e=\frac{c}{20}$	0,0700	$0{,}0700\,\omega c^2$	*id.*
		$e=\frac{c}{25}$	0,0725	$0{,}0725\,\omega c^2$	*id.*
	c' = côté intérieur.	$e=\frac{c}{30}$	0,0742	$0{,}0742\,\omega c^2$	*id.*

Types de solides (colonnes et piliers) soumis à la compression (suite).
Moments d'inertie (minimum) calculés par L.-A. Barré.

NUMÉROS	SECTIONS.	ÉPAISSEUR des nervures.	COEFFIC. θ.	MOMENTS D'INERTIE I.	SURFACES des profils.
7	Fig. 107.	$e=\frac{c}{10}$	0,032	$0{,}032\,\omega c^2 = 0{,}0061\,c^4$	$c^2-(c-e)^2$
		$e=\frac{c}{9}$	0,037	$0{,}037\,\omega c^2 = 0{,}0075\,c^4$	*idem.*
		$e=\frac{c}{8}$	0,0418	$0{,}0418\,\omega c^2 = 0{,}0098\,c^4$	*id.*
8		$e=\frac{c}{10}$	0,0948	$0{,}0948\,\omega c^2$	$2[c^2-(c-e)^2]$
		$e=\frac{c}{8}$	0,1060	$0{,}106\,\omega c^2$	*id.*
9		»	0,0625	$0{,}0625\,\omega d^2 = 0{,}049\,d^4$	$\frac{\pi d^2}{4}$
		»	0,0625	$0{,}0625\,\omega d^2 = 0{,}049\,\mathrm{D}d^3$	$\frac{\pi}{4}\,\mathrm{D}d$
10		$e=\frac{\mathrm{D}}{20}$	0,125	$0{,}125\,\omega d^2$	$\frac{\pi}{4}(\mathrm{D}^2-\mathrm{D}'^2)$
		$e=\frac{\mathrm{D}}{10}$	0,1265	$0{,}1265\,\omega d^2$	$d=\frac{\mathrm{D}+\mathrm{D}'}{2}$
11		»	0,208	$0{,}208\,\omega c^2 = 0{,}54\,c^4$	$\frac{3}{2}c^2\sqrt{3}$
12		»	0,770	$0{,}770\,\omega c^2 = 0{,}638\,c^4$	$0{,}828\,c^2$

395. Application du tableau précédent. Pour établir la formule donnant la charge de compression des fers à double **T**, type petites ailes (*voir le tableau page 460, Profil* n° 3), on prendra :

$$\mathrm{E} = 20 \times 10^9$$
$$\mathrm{B} = 800$$
$$\frac{2500}{6} = 416 \text{ kilog.},$$

ce dernier chiffre étant le coefficient de sécurité ou lâchage par centimètre carré. Avec ces données, la formule (3), page 455, donne :

Fers encastrés. *Fers non encastrés.*

$$N = \frac{416\,\omega}{1 + 0{,}000736\left(\frac{l}{h}\right)^2}, \quad N = \frac{416\,\omega}{1 + 0{,}00294\left(\frac{l}{h}\right)^2}.$$

ω est la section en centimètres carrés ;
N est la charge pratique en kilog. ;
l longueur du fer *ou support soumis à la compression* ;
h dimension de l'aile du fer *à double* T.

396. Section d'une bielle pour ferme Polonceau. — Bielle pour machine à vapeur. — Diamètre d'une tige de piston. Dans les fermes Polonceau, les bielles sont soumises à la compression. On peut les calculer comme il a été fait pour les solides soumis à la compression en tenant compte de leur section qui peut être circulaire, mais qui, le plus souvent, est cruxiforme. On devra pour plus de sécurité les considérer comme non encastrées.

Certains auteurs, entre autres Reuleaux, E. Brune, font, dans ce cas, usage de la formule (2) de Bélanger (page 453), savoir :

$$P = \frac{i^2\pi^2 EI}{l^2}. \qquad (1)$$

Le point délicat dans l'application de cette formule, c'est le choix du module d'élasticité E. Aussi les auteurs précités remplacent E par une fraction de E dont la valeur dépend du degré de sécurité que l'on veut obtenir : cela revient à prendre pour la charge P une fraction, 1/4 ou même moins encore 1/5, de ce que donnerait la formule ci-dessus. Sous ce rapport, les exemples donnés dans les divers ouvrages présentent des différences considérables. Ainsi, dans l'application de cette formule aux tiges de piston, le coefficient de sécurité est sensiblement plus faible que les chiffres ci-dessus, afin de tenir compte dans une certaine mesure des vibrations.

Dans les bielles de machines à vapeur le solide est renflé au milieu ; les dimensions transversales des extrémités sont réduites de 1/7 environ par rapport à celles du milieu. La section est circulaire, rectangulaire ou cruxiforme. Cet organe supporte alternativement des efforts de traction et de compression. Dans l'application de la formule ci-dessus, le coefficient de sécurité peut descendre à $\frac{1}{8}$.

La formule serait donc en faisant $i = 1$ (ce qui répond aux pièces non encastrées) :

$$P = \frac{\pi^2 EI}{ml^2}. \qquad (2)$$

Pour les sections circulaires, on fera :

$$I = \frac{\pi r^4}{4} = \frac{\pi d^4}{64},$$

ce qui donnera :

$$P=\frac{\pi^2 E \pi d^4}{ml^2 \cdot 64}, \quad \text{d'où:} \quad d=\sqrt[4]{\frac{64 m P l^2}{\pi^3 \cdot E}}. \qquad (3)$$

On prendra pour E les valeurs moyennes suivantes données dans le tableau (p. 412), savoir :

Bois.	$E=12\times10^8$	Fer.	$E=20\times10^9$
Fonte	$E=9\times10^9$ à 12×10^9	Acier	$E=21\times10^9$

On prendra $m=3, 4, 5, 6, 7, 8$, suivant le degré de sécurité que l'on voudra obtenir ou les risques plus ou moins grands de l'organe considéré et de la qualité de la matière.

1er *Exemple.* Soit à calculer l'effort que peut transmettre une bielle circulaire en fer d'un diamètre de 0m,10 et de 3 mètres de longueur. La formule ci-dessus en prenant $m=8$ donne $P=13500$ kilog.

2e *Exemple.* Soit à calculer la résistance d'une bielle en fonte de section cruxiforme dont la longueur est de 3 mètres, la section se rapportant au profil n° 4 avec une épaisseur des nervures $e=\frac{h}{4}$, la formule donne en prenant $E=9\times10^9$ et $m=\frac{1}{8}$, et admettant $h=0^m,100$:

$$P=2.120 \text{ kilog.}$$

397. Formule de Lamé pour tuyaux soumis à de fortes pressions.

$$e=\frac{D}{2}\left(\sqrt{\frac{R+p}{R-p}}-1\right).$$

e épaisseur du tuyau en millimètres ;
D diamètre du tuyau en millimètres ;
R coefficient de résistance par millimètre carré ;
p pression intérieure par millimètre carré.

On prend pour R les valeurs suivantes :

Acier.	12 à 20 kilog:	par millimètre carré.
Fer.	8 à 10	—
Fonte	3 à 5	—
Bronze.	2 à 5	—
Cuivre	2 à 2,5	—

Vases sphériques. La formule suivante donne en millimètres l'épaisseur du vase :

$$e=\frac{D}{2}\left(\sqrt[3]{\frac{2(R+p)}{2R-p}}-1\right),$$

R = coefficient de résistance.

On admet que la résistance à l'écrasement est par centimètre carré :

Pour le cuivre battu	7245 kilog.	Pour l'étain coulé.	1087 kilog.
Pour le cuivre jaune ou laiton.	11584 —	Pour le plomb coulé.	540 —

398. Résistance des pierres, des briques, des plâtres et des mortiers. Il convient de n'employer les matériaux du tableau suivant, comme supports isolés, que pour des hauteurs qui n'atteignent pas 12 fois la plus petite dimension de la section transversale.

Tableau des charges qui écrasent, après un temps très court, différents corps, par centimètre carré de section. Les résultats accompagnés d'un astérisque ont été fournis par des cubes ayant de 0m,01 à 0m,02 de côté; les autres ont été obtenus en opérant sur des cubes de 3 à 5 centimètres de côté (Art. 166).

DÉSIGNATION DES CORPS.	DENSITÉ.	CHARGE.
PIERRES VOLCANIQUES, GRANITIQUES, SILICEUSES ET ARGILEUSES.		kil.
Basalte de Suède et d'Auvergne.	2,95	2000
Lave dure du Vésuve (*piperno*), près Pouzzol.	2,60	590
Lave tendre de Naples.	1,97	230
Porphyre.	2,87	2470
Granit vert des Vosges.	2,85	620
Granit gris de Bretagne.	2,74	650
Granit de Normandie, dit gatmos.	2,66	700
Granit de Normandie (Flamanville).	2,71*	707*
Granit gris des Vosges.	2,64	420
Grès très dur, blanc ou roussâtre.	2,50	870
Grès tendre.	2,49	4
Grès de Fontainebleau.	2,57*	895*
Pierre porc ou puante (argileuse).	2,66	680
Pierre grise de Florence (argileuse, à grain fin).	2,56	420
PIERRES CALCAIRES.		
Marbre noir de Flandre.	2,72	790
Marbre blanc veiné, statuaire et turquin.	2,69	310
Pierre noire de Saint-Fortunat, très dure et coquilleuse.	2,65	630
Roche de Châtillon, près Paris, dure et peu coquilleuse.	2,29	170
Roche de la butte aux Cailles.	2,40*	325*
Liais de Bagneux, près Paris, très dur, à grain fin.	2,44	440
Roche douce de Bagneux, près Paris.	2,08	130
Roche d'Arcueil, près Paris.	2,30	250
Roche de Saint-Nom, près Versailles.	2,39*	263*
Pierre de Saillancourt, près Pontoise. 1re qualité.	2,41	140
Pierre de Saillancourt, près Pontoise. 2e qualité.	2,29	120
Pierre de Saillancourt, près Pontoise. 3e qualité.	2,10	90
Pierre ferme de Conflans, employée à Paris.	2,07	90
Pierre tendre (lambourde et vergelet), employée à Paris, résistant à l'eau.	1,82	60
Pierre tendre de Carrières-sous-Bois, près Saint-Germain, remplaçant le vergelet.	1,79*	58*
Lambourde de qualité inférieure, résistant mal à l'eau.	1,56	20
Calcaire dur de Givry, près Paris.	2,36	310
Calcaire tendre de Givry, près Paris.	2,07	120
Calcaire jaune oolithique de Jaumont, près Metz. 1re qualité.	2,20	180
Calcaire jaune oolithique de Jaumont, près Metz. 2e qualité.	2,01	120
Calcaire jaune d'Amanvilliers, près Metz. 1re qualité.	2,00	120
Calcaire jaune d'Amanvilliers, près Metz. 2e qualité.	2,01	100
Pierre de roche de Château-Landon.	2,63*	350*
Roche vive de Saulny, près Metz (non rompue).	2,55	300
Roche jaune de Rozérieulles, près Metz.	2,40	180
Calcaire bleu à gryphyte, donnant la chaux hydraulique de Metz (non rompue).	2,60	300
BRIQUES.		
Brique dure, très cuite.	1,56	150
Brique rouge.	2,17	60
Brique rouge pâle (probablement mal cuite).	2,09	40

DÉSIGNATION DES CORPS.	DENSITÉ.	CHARGE.
		kil.
Brique de Hammersmith.	»	70
Brique de Hammersmith (brûlée ou vitrifiée).	»	100
Brique anglaise ou flamande tendre.	»	18
Brique bien cuite, de Bourgogne.	2,20*	150*
Brique bien cuite, de Sarcelles.	2,00*	125*
Brique d'une cuisson ordinaire, de Montereau.	1,78*	110*
Brique rouge de pays (Paris).	1,52*	90*
Brique réfractaire de Bourgogne (M. Michelot).	»	162,23
Id. de Paris *id.*	»	92,51
Brique d'Herblay *id.*	»	38,15
Brique de Sarcelles *id.*	»	28,15
PLATRES ET MORTIERS.		
Plâtre au panier, gâché très-serré, 30 h. après l'emploi.	1,57	52
Plâtre au panier, gâché au lait de chaux.	»	73
Mortier ordinaire en chaux et sable.	1,65	35
Mortier en ciment ou tuileaux pilés.	1,46	48
Mortier en grès pilé.	1,68	29
Mortier en pouzzolane de Naples ou de Rome.	1,46	37
Enduit d'une conserve antique, près de Rome.	1,55	76
Enduit en ciment des démolitions de la Bastille. . . .	1,49	55
Mortier en ciment de Vassy avec moitié sable, 15 jours après le gâchage.	2,11*	155*
Béton en mortier de chaux hydraulique, de 6 mois. . .	1,85	41
D'APRÈS LES EXPÉRIENCES DE M. VICAT SUR DES CUBES DE 1 CENTIMÈTRE DE COTÉ.		
Pierre calcaire à tissu arénacé (sablonneuse).	»	94
Id. à tissu oolithique (globuleuse)	»	106
Id. à tissu compacte (lithographique) . . .	»	285
Brique crue, ou argile séchée à l'air libre.	»	33
Plâtre ordinaire, gâché ferme.	»	90
Id. gâché moins ferme que le précédent.	»	42
Mortier en chaux grasse et sable ordinaire, âgé de 14 ans.	»	19
Id. hydraulique ordinaire.	»	74
Id. éminemment hydraulique.	»	144
D'APRÈS DES EXPÉRIENCES FAITES AU CONSERVATOIRE DES ARTS ET MÉTIERS.		
1° *Pierres calcaires.*		
Roches de Bagneux, cubes de $0^m,06$ sur $0^m,06$. . . .	2,777	731
Laversine, *id.*	2,546	572
Vitry, *id.*	2,453	484
Moulin, *id.*	2,296	249
Saint-Nom, *id.*	»	432
Forgel, *id.*	2,245	244
Marly-la-Ville, cubes de $0^m,082$ sur $0^m,082$. . . .	2,065	246
Vergelet-Ferré *id.*	1,887	125
Abbaye-du-Val, *id.*	1,727	64,3
Banc-Royal, de Merry, *id.*	1,722	61,5
Vergelet-fin, *id.*	1,497	41,9
Lambourde, *id.*	1,696	36,4
Calcaire de Caumont (Eure), cubes de $0^m,08$ sur $0^m,08$.	2,020	424
Venderesse (Aisne), cubes de $0^m,10$ sur $0^m,10$.	2,50	{ 510 300
Reffroy (Meuse). *id.*	2,14	{ 127,5 90

DÉSIGNATION DES CORPS.	DENSITÉ.	CHARGE.
		kil.
Brauvilliers (Meuse), cubes de $0^m,10$ sur $0^m,10$.	2,30 1,98 1,98	187,5 69,4 30
Œuville (Meuse), *id.*	» 2,46	172,5 127,5
Verdun (Meuse), *id.*	2,26	60 45
Craie d'Épernay, de Barjard (humide).	1,80	24,37 18,75
Id. du haut du faubourg.	1,625	37,5 30
2° *Grès bigarré des Vosges.*		
(Ce grès de couleur rose ou blanche, d'un grain fin, que l'on extrait en gros blocs, est facile à tailler et sculpter, et il convient pour les constructions.)		
Niederwiller, cubes de $0^m,08$ sur $0^m,08$. . . .	2,170	490 430
Witzbourg, *id.*	»	412
Bréménil, *id.*	»	517 368
Kibolo, *id.*	»	419
Arscheviller, *id.*	»	430 352 303
Artzwiller, *id.*	»	396
Merwiller, *id.*	»	294
3° *Meulières.*		
Meulière dure de Chêne-la-Reine (Marne), très poreuse, cubes de $0^m,10$ sur $0^m,10$. . . .	1,517	75 15
Meulière tendre, *id.* *id.*	1,175	63,75 30
4° *Cubes artificiels en plâtre et silice.*		
Plâtre silicaté sans cailloux, cubes pleins de $0^m,20$ de côté.	»	49,50
Id. avec cailloux *id.*	»	64,32
Id. sans cailloux, cubes de $0^m,20$ de côté, évidés de manière à diminuer de 1/4 la section résistante.	»	58,38
Id. avec cailloux, cubes de $0^m,20$ de côté, évidés de manière à diminuer de 1/4 la section résistante.	»	66,77

La résistance du mortier de ciment de Vassy à la pression a été expérimentée par MM. Gariel et Garnier, en écrasant des prismes de $0^m,16$ de longueur, $0^m,08$ de largeur et $0^m,054$ d'épaisseur, fabriqués depuis deux ans et demi, et qui étaient constamment restés à l'air. Dix expériences successives ont donné pour limites supérieure et inférieure de résistance 197 et 121 kilog., et en moyenne 150 kilog. par centimètre carré. Si ces prismes étaient restés pendant le même temps dans l'eau ou dans une terre humide, leur résistance eût été plus grande de 1/5 environ.

Dans la pratique, la charge permanente qu'il convient de faire sup-

porter aux matériaux (du tableau précédent) n'est que 1/10 de celle qui produit la rupture; dans les constructions les plus légères, elle ne dépasse pas 1/6, et dans les constructions de moellons ou de petits matériaux, et souvent de pierres de taille, il convient de la réduire à 1/15 et même à 1/20; il en est de même pour les supports isolés dont le rapport de la hauteur à la plus petite dimension de la section transversale est très grand.

D'après Vicat, une maçonnerie, après cinq mois, peut supporter, sans altération quelconque, 200000 kilog. par mètre carré (20^k par cent. carré) pour un appareil en pierre de taille, et 40000 kilog. en moyenne pour un massif en moellons bien gisants en mortier médiocrement hydraulique (4^k par cent. carré).

Lorsqu'il s'agit d'une maçonnerie de voûte, laquelle offre plus de difficultés d'exécution et de chances de destruction, et qui est abandonnée à elle-même avant que le mortier ne soit tout à fait pris, nous pensons que les coefficients ci-dessus de Vicat doivent ordinairement être réduits au quart. Les ingénieurs et architectes peuvent, du reste, modifier cette valeur selon les soins apportés dans la construction, le retard mis au décintrement et le degré de stabilité dont doit jouir la construction.

Dejardin, ingénieur des ponts et chaussées, dans sa *Routine de l'établissement des voûtes*, a donné les valeurs suivantes du coefficient de *résistance pratique à l'écrasement*, par mètre carré, selon les diverses espèces de maçonneries qui peuvent être adoptées pour l'établissement des voûtes, savoir :

			kil.	
Maçonnerie	en moellons	informes, en bétons. . . .	5000	($0^k,5$ par cent. c.)
Id.	*id.*	dits *pendants*.	10000	(1 ,0 *id.*)
Id.	*id.*	équarris, bien posés. . . .	20000	(2 ,0 *id.*)
Id.	*id.*	appareillés en coupe	30000	(3 ,0 *id.*)
Id.	en pierres de taille appareillées. . . .		50000	(5 ,0 *id.*)

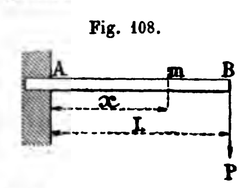
On a remarqué que les pierres soumises à l'écrasement résistent d'autant mieux que leur section se rapproche davantage de la forme circulaire; ainsi, pour deux pierres de même hauteur, dont la section était carrée pour la première et circulaire pour la deuxième, les résistances ont été dans le rapport des nombres 8 et 9. On a remarqué aussi que la résistance d'un tube étant 1, celle du cylindre inscrit est 0,80 quand il repose sur sa base, et 0,32 quand il repose sur une arête, et que celle de la sphère inscrite est 0,26.

399. Résistance des solides à la flexion. Nous allons rappeler les formules se rapportant à la *résistance à un effort transversal, d'une pièce prismatique encastrée par une de ses extrémités et sollicitée à l'autre par une force unique* P. La section d'encastrement étant évidemment celle où les fibres qui composent la pièce ont à supporter le plus grand moment, c'est pour cette section qu'il faut calculer les dimensions de la pièce, dont la résistance totale se compose de la somme des moments à la traction et à la compression de toutes les fibres qui tra-

versent la section d'encastrement. Il faut dire à la traction et à la compression, car les fibres de la partie convexe du solide sont tirées, celles de la partie concave (en bas) sont comprimées et il y a une nappe de *fibres moyennes* qui sépare les précédentes, qui ne supporte ni traction ni compression.

Ce qui va suivre suppose que la résistance à la traction est égale à la résistance à la compression, ce qui n'est vrai que dans les limites d'élasticité, c'est-à-dire dans les limites où les raccourcissements et allongements sont égaux entre eux et proportionnels aux charges (360 et 381).

Fig. 108.



Comme, dans la pratique, il ne faut jamais dépasser ni même atteindre ces limites, les formules suivantes satisferont aux applications.

Le *moment de résistance* μ de la pièce, c'est-à-dire la somme des moments de résistance de toutes les fibres, pris par rapport à la ligne des fibres invariables, est égal au moment de la force P pris par rapport à la section d'encastrement; on a donc (*fig.* 108):

$$PL = \frac{RI}{n} = \mu. \tag{1}$$

Pour une section quelconque faite en m, le moment fléchissant est :

$$\mu = P(L - x).$$

L bras de levier de la force P, ou distance de la section d'encastrement de la pièce au point d'application de P, si P agit normalement à la longueur de la pièce;

$\mu = PL$ *moment fléchissant* de la pièce en A;

$\frac{RI}{n}$ *moment de résistance* de la pièce;

$\frac{I}{n}$ *module de section transversale du solide*;

R *coefficient de sécurité* ou plus grand effort à la traction et à la compression supporté par les fibres les plus éloignées de l'axe neutre du solide;

I moment d'inertie de la section d'encastrement pris par rapport à la ligne des fibres invariables; il est égal à $\int v^2 d\omega$, c'est-à-dire à la somme des produits des divers éléments $d\omega$ qui composent la section de rupture par le carré de la distance variable v de chaque élément à la ligne des fibres invariables;

n distance des fibres les plus éloignées de l'axe neutre, qui passe par le centre de gravité de la section; n est le maximum de v.

Dans le cas de la figure 108 la flèche est donnée par la formule :

$$\frac{PL^3}{3} = EIf, \quad \text{d'où:} \quad f = \frac{PL^3}{3EI}. \tag{2}$$

E module ou coefficient d'élasticité (360);

f flèche produite ou quantité dont s'abaisse le point d'application de P dans la direction de cette force;

$\frac{EI}{\rho}$ *moment d'élasticité* de la pièce. ρ est le rayon de courbure de la courbe affectée par les fibres invariables, quand la pièce est fléchie. Le moment fléchissant est

égal au moment de résistance et aussi égal au moment d élasticité dans chaque section transversale et l'on a, pour la section A, la valeur maximum :

$$\mu = \mathrm{PL} = \frac{\mathrm{RI}}{n} = \frac{\mathrm{EI}}{\rho}.$$

L'*effort tranchant* T est la force qui tend à trancher la pièce suivant une section transversale quelconque, en la faisant glisser sur cette section. Ici, cet effort est égal à P dans toute section *m* T est la dérivée de μ.

Nous avons donné les définitions précédentes pour la section d'encastrement et pour le cas d'une force unique P; mais on les appliquera facilement à une section quelconque transversale d'un solide sollicité par un nombre quelconque de forces perpendiculaires à sa dimension.

Pour une pièce prismatique à section rectangulaire, on a :

(*a*) $$n = \frac{h}{2} \quad \text{et} \quad \mathrm{I} = \frac{bh^3}{12},$$ (*Int.* 1827)

par suite : $$\frac{\mathrm{I}}{n} = \frac{bh^2}{6}.$$

Les deux formules (1) et (2) deviennent, pour le cas actuel d'une pièce encastrée d'un seul bout en remplaçant *n* et I par leurs valeurs :

$$\mathrm{PL} = \frac{\mathrm{R}bh^2}{6}, \tag{1'}$$

et $$\frac{\mathrm{PL}^3}{3} = \frac{\mathrm{E}bh^3 f}{12}, \quad \text{d'où} \quad f = \frac{4\mathrm{PL}^3}{\mathrm{E}bh^3}. \tag{2'}$$

b largeur de la section transversale et rectangulaire de la pièce ou dimension de cette section perpendiculaire à la direction de la force P;

h hauteur de la pièce, ou dimension de cette section transversale parallèle à la direction de la force P.

La quantité $\frac{\mathrm{R}bh^2}{6}$ de l'équation (1') étant connue pour une pièce de section rectangulaire donnée, on en conclura la valeur de P ou celle de L, l'une ou l'autre de ces quantités étant connue. Si les valeurs de P et L étaient données d'avance, de cette même équation on tirerait celles de *b* et *h*, en établissant entre *b* et *h* un rapport convenable, suivant la nature du solide soumis à la flexion. Pour les pièces de fonte sans nervures, on fait $b = \frac{1}{12}h$ au minimum, $b = \frac{1}{4}h$ au maximum. Pour le bois, on fait varier *b* entre $\frac{1}{3}$ et $\frac{1}{2}$ de *h*, et même, pour les pièces isolées, il convient de faire $b = \frac{5}{7}h$.

P *étant exprimé en kilogrammes, et les quantités* L, b, h *et* f *en mètres, on a pour* E *et* R *les valeurs du tableau suivant; les premières valeurs de* R *sont les moyennes des cas ordinaires de la pratique, et les secondes supposent des matériaux de choix.*

DÉSIGNATION DES MATIÈRES.	VALEUR DE E. (p. 411)	VALEURS DE R qu'on ne doit pas dépasser dans la pratique, par mètre carré.
Chêne	1200000000	550000 à 750000
Sapin jaune ou blanc	1300000000	600000 à 800000
Arcs en planches	500000000	250000 à 300000
Fer doux forgé	20000000000	6000000 à 10000000
Fer laminé en barres et tubes en tôle	12000000000	4700000 à 7800000
Acier d'Allemagne	21000000000	12500000 à 16600000
Acier fondu	30000000000	16600000 à 22000000
Fonte grise à grain fin	12000000000	7500000 à 10000000
Fonte grise ordinaire, anglaise	9000000000	5600000 à 7500000

Application. Quelles doivent être les valeurs de b et h, d'une pièce de sapin encastrée par une extrémité, pour $P = 500$ kilog. et $L = 1^m,50$, en négligeant le poids de la pièce ?

Faisant $b = \frac{5}{7}h$, et remplaçant les lettres par leurs valeurs dans la formule (1'), on a (en prenant R égal à 600000) :

$$500 \times 1,5 = \frac{600000 \times 5 \times h^3}{7 \times 6}, \text{ d'où } h = \sqrt[3]{\frac{500 \times 1,5 \times 7 \times 6}{600000 \times 5}} = 0^m,219,$$

$$f = \frac{4 \times 500 \times (1,5)^3}{1300000000 \times 0,156 \times (0,219)^3} = 0^m,0031.$$

400. Valeur du moment d'inertie I pour un solide d'un profil quelconque. Chacune des deux parties d'une pièce rectangulaire séparées par la ligne des fibres invariables donne une valeur I' moitié du moment d'inertie entier, c'est-à-dire (Voir (*a*), p. 469) :

$$I' = \frac{I}{2} = \frac{bh^3}{24}, \qquad (\textit{Int. } 1827)$$

ou, en appelant h' la moitié de la hauteur du profil, on a :

$$I' = \frac{bh'^3}{3} \quad \text{et} \quad I = 2I'.$$

Cela établi, s'il s'agit d'un profil quelconque, on déterminera son centre de gravité, soit par les moyens connus, soit par la formule de Simpson (*Int.* 1609, 1816 et 1828); on mènera par ce centre de gravité l'axe d'inertie; on divisera la longueur de cette ligne en un nombre pair m de parties égales, et par les points de division on mènera des perpendiculaires à cette ligne, m ayant été pris assez grand pour que l'on puisse considérer les profils compris entre les perpendiculaires comme rectangulaires, chaque profil élémentaire, au-dessus ou au-dessous de la ligne des fibres invariables, se trouvera dans les conditions de la dernière formule, la formule de Simpson donnera (h'_0, h'_1, $h'_2 \ldots h'_m$

étant les hauteurs des profils élémentaires). On l'appliquera pour les $2I' = I$.

$$I' = \frac{b}{3 \times 3m}[h_0'^3 + h_m'^3 + 4(h_1'^3 + h_3'^3 + \ldots + h_{m-1}'^3) + 2(h_2'^3 + h_4'^3 + \ldots + h_{m-2}'^3)].$$

401. Moments d'inertie des sections les plus usuelles pour les solides soumis à la flexion. *La section du solide étant un parallélogramme dont la base* b *est perpendiculaire à la direction de* P, h *étant la hauteur du parallélogramme*, on a pour n et I les mêmes expressions que pour la section rectangulaire, qui n'est qu'un cas particulier de cette dernière. *Si la section transversale du solide est un carré dont le côté est* c, on a, dans le cas où il est fléchi dans le sens d'un côté :

Fig. 109.

$$n = \frac{c}{2}, \quad I = \frac{c^4}{12} \quad \text{et} \quad \frac{I}{n} = \frac{c^3}{6}.$$

Si la coupe transversale du solide prismatique encastré par l'une de ses extrémités et sollicité à l'autre par la force P *a la forme indiquée figure* 109, on a :

$$n = \frac{h}{2}, \quad I = \frac{bh^3 - b'h'^3}{12}, \quad \text{et} \quad \frac{I}{n} = \frac{bh^3 - b'h'^3}{6h}.$$

Comme le font voir ces formules, la section est considérée comme étant la différence de deux rectangles.

Fig. 110.

Si le solide, au lieu d'être évidé au milieu, l'était latéralement, comme l'indique la figure 110, on aurait encore :

$$n = \frac{h}{2}, \quad I = \frac{bh^3 - b'h'^3}{12},$$

et

$$\frac{I}{n} = \frac{bh^3 - b'h'^3}{6h}.$$

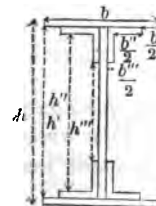


Fig. 111.

Dans le cas où les nervures b *sont renforcées par des cornières*, comme cela arrive pour les poutres en tôle (*fig.* 111), on a :

$$n = \frac{h}{2}, \quad I = \frac{bh^3 - (b'h'^3 + b''h''^3 + b'''h'''^3)}{12},$$

et

$$\frac{I}{n} = \frac{I}{6h}.$$

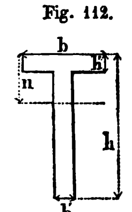


Fig. 112.

Dans le cas où la section transversale a la forme d'un T, comme l'indique la figure 112, on a, pour la distance maximum des fibres à l'axe neutre :

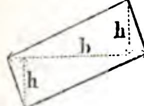
$$n = \frac{1}{2} \times \frac{bh'^2 - b'h'^2 + b'h^2}{bh' - b'h' + b'h},$$

et $\quad I = \frac{1}{3}[bn^3 - (b - b')(n - h')^3 + b'(h - n)^3]$,

le centre de gravité se détermine graphiquement.

La section du solide étant un parallélogramme dont la diagonale b *est perpendiculaire à la direction de la force fléchissante* P (*fig.* 113), on a :

Fig. 113.



$$n = h, \quad \mathrm{I} = \frac{bh^2}{6}, \quad \text{et} \quad \frac{\mathrm{I}}{n} = \frac{bh^2}{6}. \qquad (Int.\ 1827)$$

Si la section est un carré ayant c *pour côté*, le solide étant sollicité suivant sa diagonale, on a :

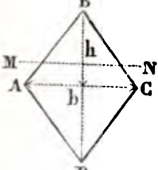
$$b = \frac{2c}{\sqrt{2}} \quad \text{et} \quad n = h = \frac{c}{\sqrt{2}} = \frac{c\sqrt{2}}{2},$$

et ces valeurs donnent :

$$\mathrm{I} = \frac{c^4}{12} \quad \text{et} \quad \frac{\mathrm{I}}{n} = \frac{c^3}{12}\sqrt{2}.$$

Si la section est un losange ABCD *ou un carré* (*fig.* 114), les formules sont les mêmes que pour le parallélogramme (*fig.* 113).

Fig. 114.



b étant toujours égal à AC, et $h = n = \frac{\mathrm{BD}}{2}$, on a :

$$\mathrm{I} = \frac{bh^3}{6} \quad \text{et} \quad \frac{\mathrm{I}}{n} = \frac{bh^2}{6}.$$

Pour un carré de côté c, on a :

$$b = c\sqrt{2}, \quad h = \frac{c}{2}\sqrt{2} \quad \text{et} \quad \frac{\mathrm{I}}{n} = \frac{\sqrt{2}}{12}c^3 = 0{,}118c^3.$$

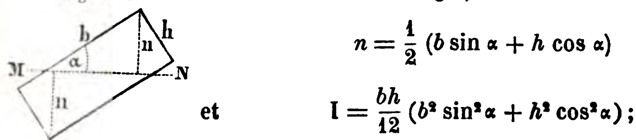
Lorsque la section d'un solide est un triangle ABC (*fig.* 114), et que l'axe neutre MN est parallèle à l'un des côtés, on a :

$$n = \frac{2}{3}h \quad \text{et} \quad \mathrm{I} = \frac{1}{36}bh^3; \qquad (Int.\ 1827)$$

$$\frac{\mathrm{I}}{n} = \frac{1}{24}bh^2.$$

La section du solide étant un rectangle disposé de manière que l'axe d'inertie, b *et* h *étant la base et la hauteur du triangle* MN, *fasse avec le côté* b *un angle* α (*fig.* 115), on a (*Int.* 1078) (h et b étant les deux côtés du rectangle) :

Fig. 115.



$$n = \frac{1}{2}(b \sin\alpha + h\cos\alpha)$$

et

$$\mathrm{I} = \frac{bh}{12}(b^2\sin^2\alpha + h^2\cos^2\alpha);$$

Si $\alpha = 0$, $\sin\alpha = 0$, $\cos\alpha = 1$, $\mathrm{I} = \frac{bh^3}{12}$, $\frac{\mathrm{I}}{n} = \frac{bh^2}{6}$,

valeurs déjà trouvées (page 469) pour la section rectangulaire de base b et de hauteur h, quand la pièce est fléchie dans le sens de la hauteur.

La section du solide étant un cercle de rayon r, on a :

$$n = r \quad I = \frac{\pi r^4}{4}; \quad \text{et} \quad \frac{I}{n} = \frac{\pi r^3}{4}. \qquad (\textit{Int. } 1827).$$

Si le solide est un cylindre creux de rayons r et r', on a les formules :

$$n = r; \quad I = \frac{\pi}{4}(r^4 - r'^4), \quad \text{et} \quad \frac{I}{n} = \frac{\pi}{4r}(r^4 - r'^4).$$

En faisant $r' = 0$, on obtient celles du cylindre plein.

Pour un solide à section elliptique dont $2h$ est l'axe vertical et $2b$ l'axe horizontal (*Int.* 1128), on a :

$$n = h, \quad I = \frac{\pi}{4} bh^3, \quad \text{et} \quad \frac{I}{n} = \frac{\pi}{4}(bh^2). \qquad (\textit{Int. } 1827)$$

Pour $b = h$, on retrouve les formules relatives à la section circulaire.

Pour un solide creux à section elliptique, $2h$ et $2b$ étant les axes de l'ellipse extérieure, et $2h'$ et $2b'$ ceux de l'ellipse intérieure (*fig.* 116), on a :

Fig. 116.

$$n = h, \quad I = \frac{\pi}{4}(bh^3 - b'h'^3),$$

$$\frac{I}{n} = \frac{\pi}{4h}(bh^3 - b'h'^3).$$

NOTA. *Nous rapprochons ici les valeurs de* $\frac{I}{n}$ *de quelques polygones régulier et de celle du cercle.*

Pour un *h exagone régulier* de côté $c = r$, dont l'axe d'inertie est parallèle à l'un des côtés :

$$I = 0{,}5143c^4; \quad \frac{I}{n} = \frac{5}{8}c^3; \quad \omega = 2{,}6c^2.$$

Si l'axe d'inertie est un diamètre :

$$I = 0{,}5143c^4; \quad \frac{I}{n} = 0{,}5143c^3; \quad \omega = 2{,}6c^2.$$

Pour un *octogone régulier* inscrit dans un cercle de rayon r, dont l'axe d'inertie est parallèle à l'un des côtés :

$$I = 0{,}638r^4; \quad \frac{I}{n} = 0{,}677r^3; \quad \omega = 2{,}828r^2.$$

Pour un cercle $I = \frac{\pi r^4}{4} = 0{,}785r^4; \quad \frac{I}{n} = \frac{\pi r^3}{4} = 0{,}785r^3; \quad \omega = 3{,}1416r^2.$

Valeurs de $\frac{I}{n}$ *(pour quelques profils) dans le cas où cette quantité augmente par la troncature des profils.* D'après Saint-Venant, pour un prisme à section carrée, sollicité à fléchir suivant une diagonale, on augmente la résistance de 0,1136 (de 1/9 à 1/8), en retranchant du solide, en haut ou en bas, un seul triangle dont le côté soit les 0,2446 (le quart environ) du côté du carré.

Deux troncatures (en haut et en bas), qui enlèvent de la section carrée deux triangles dont le côté est le 1/9 de celui du carré, augmentent la résistance du solide de 0,0535 (1/19 à 1/18) de sa valeur.

Pour un *prisme triangulaire* placé sur une de ses faces, on augmente sa résistance à la flexion de 0,0962 (1/11 environ) en supprimant au sommet un triangle dont le côté soit les 0,1304 (le 1/7 environ) du côté du triangle primitif.

402. Fers laminés à double T employés pour planchers et combles. (Moments d'inertie.) Aujourd'hui, on fait un usage considérable des fers laminés à double T symétriques dans la construction des planchers et des combles. Toutes les usines métallurgiques fabriquent de ces fers et il est facile de constater, d'après les albums des usines, que les échantillons présentent d'une usine à l'autre des différences très grandes au point de vue des poids par mètre courant et aussi au point de vue des profils. Chaque usine a ses modèles, formant plusieurs séries, mais pouvant se résumer en deux grandes divisions :

1° Les fers dits *à petites ailes*, ou fers ordinaires, dont les hauteurs varient de 2 en 2 centimètres depuis 8 centimètres de hauteur jusqu'à 24 et 26 centimètres;

Une autre série de fers à petites ailes, appelés *gros fers*, présentant les mêmes hauteurs que les précédents et les mêmes profils, mais dont toutes les dimensions transversales ont été augmentées de quelques millimètres. Ces gros fers, qui sont obtenus en écartant plus ou moins les cylindres des laminoirs, sont en général moins économiques que les fers ordinaires, parce qu'ils présentent une augmentation de poids plus grande que l'accroissement de résistance. Pour une hauteur donnée de fers, chaque usine fabrique un *fer minimum* et un *fer maximum*, et sur commande elle fabrique des modèles intermédiaires.

2° Des fers dits *larges ailes* sont fabriqués par les usines. Les ailes ou doubles T sont très développés. Ils forment des séries très variées; pour chaque modèle il y a aussi un minimum et un maximum de largeur.

Il est essentiel de noter que les usines ont tellement multiplié leurs modèles sans aucune loi sous le rapport des poids, des nervures et des résistances des échantillons, qu'il est impossible de faire un tableau donnant la résistance moyenne de ces fers, et qu'il faudrait, en toute rigueur, un tableau pour chaque usine. Nous donnons ci-après les valeurs des modules de section $\frac{I}{n}$ des fers de quelques usines et aussi les moments de résistance $R\frac{I}{n}$, calculés avec les coefficients de sécurité 6, 8 et 10 kilog. par millimètre carré de la section transversale des profils. Ces chiffres doivent être considérés comme des jalons qui permettront d'apprécier par comparaison, avec une approximation souvent suffisante, la résistance des fers des autres usines dont les profils et les poids présentent des différences avec ceux des tableaux. Ces tableaux trouveront leurs applications dans le calcul des PLANCHERS (2ᵉ volume).

403. *Usine de la Providence.*

HAUTEUR des fers.	POIDS par mètre.	MODULES DE SECTION $\frac{I}{n}$	VALEURS DE R $\frac{I}{n}$. 6 kilog.	8 kilog.	10 kilog.
		Petites ailes.			
mèt.	kilog.				
0,10	9	0,000 033 03	198	264	330
	12	0,000 039 53	237	314	395
0,12	11	0,000 046 90	281	375	469
	15	0,000 057 22	343	457	572
0,14	14	0,000 067 36	404	538	673
	20	0.000 085 32	511	682	853
0,16	15	0,000 081 63	489	653	816
	25	0,000 115 7	694	926	1 157
0,18	20	0,000 120 5	724	964	1 205
	30	0,000 159 4	956	1 275	1 594
0,20	25	0,000 171 5	1 029	1 382	1 715
	35	0,000 214 2	1 285	1 713	2 142
0,22	26	0,000 198 3	1 189	1 586	1 983
	40	0,000 264 4	1 586	2 115	2 644
0,26	36,40	0,000 299 8	1 799	2 398	2 998
	54,40	0,000 400 1	2 400	3 201	4 000
0,30	65	0,000 721 6	4 330	5 773	7 216
	85	0,000 849 1	5 095	6 793	8 491

404. *Usine de Montataire.*

HAUTEUR des fers.	POIDS par mètre.	MODULES DE SECTION $\frac{I}{n}$	VALEURS DE R $\frac{I}{n}$. 6 kilog.	8 kilog.	10 kilog.
		Petites ailes.			
mèt.	kilog.				
0,10	8,06	0,000 029 89	179	239	299
	11,56	0,000 037 39	224	299	374
0,12	10	0,000 044 20	266	354	442
	14,28	0,000 055 24	331	441	552
0,14	13	0,000 065 73	394	525	657
	18	0,000 080 76	484	645	807
0,16	16,50	0,000 093 89	563	751	939
	25	0,000 122 9	733	981	1 229
0,18	20	0,000 125 4	752	1 003	1 254
	30	0,000 163 8	982	1 310	1 638
0,20	22	0,000 153 8	923	1 230	1 538
	34,40	0,000 207 2	1 243	1 657	2 071
0,22	24,30	0,000 184 1	1 104	1 472	1 841
	38	0,000 248 6	1 492	1 989	2 486
0,26	45	0,000 470 4	2 822	3 763	4 704
	61	0,000 562 7	3 376	4 501	5 626
		Larges ailes.			
0,175	23,50	0,000 143 0	857	1 143	1 429
	30,30	0,000 168 5	1 011	1 348	1 685

405. *Usine du Creusot.*

HAUTEUR des fers.	POIDS par mètre.	MODULES DE SECTION $\frac{I}{n}$	VALEURS DE $R\frac{I}{n}$. 6 kilog.	8 kilog.	10 kilog.
		Petites ailes.			
mèt.	kilog.				
0,10	9,00	0,000 032 14	193	257	321
	13,00	0,000 041 95	252	335	419
0,12	10,00	0,000 046 97	282	375	469
	15,00	0,000 060 57	303	454	605
0,14	13,00	0,000 064 80	389	518	648
	19,00	0,000 084 40	506	675	844
0,16	15,00	0,000 088 72	532	709	887
	22,00	0,000 112 2	673	897	1 122
0,18	18,75	0,000 121 8	731	974	1 218
	28,50	0,000 159 6	957	1 276	1 596
0,20	21,20	0,000 153 7	922	1 229	1 537
	32,15	0,000 199 8	1 198	1 598	1 998
0,22	24,60	0,000 195 6	1 173	1 564	1 956
	36,60	0,000 260 8	1 565	2 086	2 608
		Larges ailes.			
0,125	16,00	0,000 080 81	484	646	808
	19,00	0,000 088 62	531	709	886
0,175	22,50	0,000 137 9	827	1 103	1 379
	32,00	0,000 193 6	1 161	1 548	1 936
0,200	28,00	0,000 219 3	1 316	1 754	2 193
	37,50	0,000 259 3	1 556	2 074	2 593
0,235	32,00	0,000 297 3	1 783	2 378	2 973
	41,00	0,000 343 4	2 060	2 747	3 434
0,235	38,00	0,000 357 4	2 144	2 859	3 574
	47,00	0,000 403 5	2 421	3 228	4 035
0,250	37,00	0,000 358 2	2 149	2 865	3 582
	46,50	0,000 410 3	2 469	3 282	4 103
0,250	38,00	0,000 362 0	2 172	2 896	3 620
	48,00	0,000 414 0	2 484	3 312	4 140
0,250	46,00	0,000 438 4	2 630	3 507	4 384
	56,00	0,000 490 5	2 943	3 924	4 905

406. *Société de Vezin-Aulnoye.*

HAUTEUR des fers.	POIDS par mètre.	MODULES DE SECTION $\frac{I}{n}$	VALEURS DE R $\frac{I}{n}$. 6 kilog.	8 kilog.	10 kilog.
		Petites ailes.			
mèt.	kilog.				
0,08	7,9	0,0000285	171	228	285
	10,1	0,0000316	189	252	316
0,10	10,0	0,0000455	273	364	455
	13,0	0,0000522	313	417	522
0,12	14,0	0,0000743	446	594	743
	17,7	0,0000839	503	671	839
0,14	18,0	0,0001114	668	891	1114
	22,3	0,0001245	747	996	1245
0,16	22,2	0,0001560	936	1248	1560
	27,7	0,0001752	1051	1400	1752
0,18	27,1	0,0002179	1307	1743	2179
	33,9	0,0002449	1469	1959	2449
0,20	26,1	0,0002236	1341	1788	2236
	33,8	0,0002576	1545	2060	2576
0,20	29,9	0,0002607	1564	2085	2607
	37,5	0,0002936	1761	2348	2936
0,22	33,0	0,0002907	1744	2325	2907
	38,0	0,0003150	1890	2520	3150
0,22	36,4	0,0003437	2062	2750	3437
	45,6	0,0003881	2328	3104	3881
0,25	36,6	0,0003454	2072	2763	3454
	46,2	0,0003974	2384	3179	3974
0,25	37,0	0,0003963	2378	3170	3963
	48,4	0,0004588	2753	3670	4588
0,25	43,2	0,0004797	2878	3837	4797
	54,6	0,0005422	3253	4337	5422
0,26	43,3	0,0004857	2914	3885	4857
	53,2	0,0005420	3252	4336	5420
0,30	57,0	0,0007153	4292	5722	7153
	68,6	0,0007903	4742	6322	7903
0,35	72,5	0,0010216	6130	8172	10216
	84,0	0,0013480	8088	10784	13480

407. Proportions des nervures des fers laminés pour planchers et combles. La théorie donne quelques indications pour proportionner, dans les fers à double T, les largeurs des T à la hauteur des fers. La hauteur triple de la largeur des ailes est une bonne proportion. Mais il arrive que cette proportion ne peut pas être observée, lorsque la hauteur du fer est limitée et que, d'autre part, le modèle doit satisfaire à une résistance donnée. Il faut alors nécessairement augmenter la largeur des ailes et leurs épaisseurs. C'est sans doute pour satisfaire à des conditions de grande résistance que les usines ont multiplié leurs profils et ont fait des fers à larges ailes, dans lesquels les ailes dépassent quelquefois les deux tiers de la hauteur du fer. Mais comme il a été dit, il est regrettable que les modèles des usines ne présentent aucune loi. Il y aurait certainement un grand intérêt pratique à ce que les fers à double T des usines eussent des proportions déterminées. Pour satisfaire à toutes les exigences, on pourrait adopter plusieurs séries de fers présentant chacune des proportions simples entre les hauteurs des fers, leurs largeurs et les épaisseurs des nervures. Pour fixer les idées à cet égard, admettons les trois types suivants pour représenter respectivement les fers à petites ailes, les fers à larges ailes et les fers à très larges ailes.

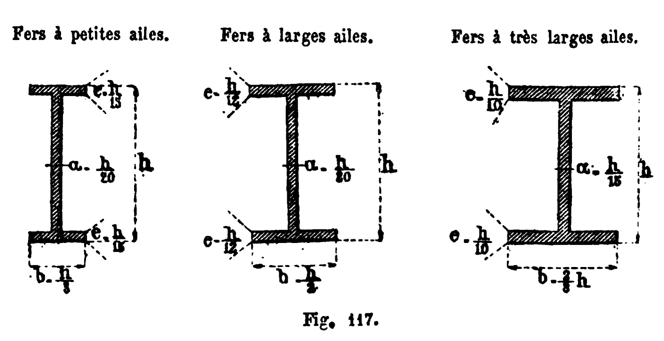


Fig. 117.

Avec ces proportions, chaque série pourrait présenter des échantillons dont les hauteurs varieraient de 2 centimètres depuis 8 centimètres jusqu'à 40 (*et même de centimètre en centimètre*).

Dans chacune de ces trois séries, les poids par mètre courant varieraient comme le carré des hauteurs, les modules de section $\frac{I}{n}$, comme les cubes des hauteurs, et les moments d'inertie I comme les quatrièmes puissances de la hauteur. Les poids et les modules de résistance seraient exprimés en fonctions de la hauteur, comme au tableau page 479.

Nous ferons remarquer que les fers à double T (petites ailes) (*fig.* 117, *Profil à gauche*) sont un peu moins nervés (renforcés) que la moyenne des fers (à petites ailes) des usines; en effet M. P. Planat donne dans la *Mécanique appliquée à la résistance des matériaux* pour la valeur

moyenne du module de section : $\frac{I}{n} = 0{,}300Sh$, au lieu de $0{,}208Sh$ donnée au tableau ci-dessous. Le même auteur donne pour les fers très larges ailes : $\frac{I}{n} = 0{,}420Sh$, valeur plus grande que celle de notre 3e série.

PROFILS.	POIDS par mètre.	MOMENTS d'inertie.	MODULES DE SECTION $\frac{I}{n}$	SECTIONS en mètres carrés.
1re série . . .	$686{,}4\,h^2$	$0{,}0125\,h^4$	$0{,}025\,h^3 = 0{,}208\,Sh$	$0^{mq}{,}088\,h^2$
2e série. . . .	$975\,h^2$	$0{,}020\,h^4$	$0{,}040\,h^3 = 0{,}320\,Sh$	$0^{mq}{,}125\,h^2$
3e série. . . .	$1287\,h^2$	$0{,}030\,h^4$	$0{,}060\,h^3 = 0{,}363\,Sh$	$0^{mq}{,}165\,h^2$

408. Applications des formules générales de la flexion. Pièce prismatique encastrée par une de ses extrémités, chargée uniformément sur toute sa longueur. Dans ce cas, les deux formules (1) et (2) du n° 399 deviennent :

$$pL \times \frac{L}{2} = \frac{RI}{n} \quad \text{ou} \quad \frac{pL^2}{2} = \frac{RI}{n}, \tag{1}$$

et

$$\frac{1}{8}pL \times L^3 = EIf \quad \text{ou} \quad \frac{pL^4}{8} = EIf. \tag{2}$$

Les lettres L, R, I, n, E et f ont les mêmes significations qu'au n° 399.

p charge par mètre de longueur de la pièce; c'est, par exemple, le poids de chaque mètre de longueur de la pièce ou toute autre charge uniforme comprenant la charge des poutres ou solives;

pL charge totale uniforme;

$\frac{L}{2}$ bras de levier de la résultante ou de la charge uniforme pL.

Pour une section normale, faite en m (voir *fig.* 108, p. 468), le moment fléchissant et l'effort tranchant ont pour expressions :

$$\mu = \frac{p(L-x)^2}{2} \quad \text{et} \quad T = p(L-x) \quad (\textit{dérivée de } \mu).$$

En comparant la formule précédente (1) avec la formule analogue (1) du n° 399, on voit qu'une même pièce peut supporter une charge totale pL, répartie uniformément sur toute sa longueur, double de la charge P qu'elle porte quand P est appliquée à l'extrémité de sa longueur, et en comparant la formule précédente (2) avec la formule analogue (2) du n° 399, on voit qu'une même pièce donne, pour une charge égale, une flèche f qui n'est, pour le cas où la charge est uniformément répartie, que les 3/8 de celle produite par la même charge appliquée à l'extrémité de la pièce; ce qui revient à dire que pour produire une même flèche la charge uniformément répartie doit être au poids unique appliqué à l'extrémité de la pièce dans le rapport de 8 à 3 pour $x = 0$, $T = pL$.

En remplaçant, dans les formules (1) et (2), n et I par les différentes valeurs qui conviennent aux formes des sections transversales des pièces, on obtiendra des formules analogues à celles du n° 399; ainsi pour une pièce prismatique à section rectangulaire, on aura :

$$\frac{pL^2}{2} = \frac{Rbh^2}{6},$$

et $$\frac{pL^4}{8} = \frac{Ebh^3f}{12}, \quad \text{d'où} \quad f = \frac{3pL^4}{2Ebh^3}.$$

Pour les données de l'application de la page 470, c'est-à-dire pour $L = 1^m,50$ et $pL = 500$ kilog., remplaçant les lettres par leurs valeurs dans les formules précédentes, on tire $h = 0^m,174$, $b = 0^m,124$ et $f = 0^m,0031$.

409. **Pièce encastrée par une de ses extrémités, chargée d'un poids P appliqué à son extrémité libre et d'un poids pL réparti uniformément sur toute sa longueur.** (Ce cas se présente particulièrement toutes les fois qu'en outre du poids P, on est obligé de tenir compte du poids de la pièce.) Avec ces données, les formules (1) et (2) des n°s 399 et 408 deviennent, en conservant aux lettres les mêmes significations :

$$PL + \frac{pL^2}{2} = \frac{RI}{n} \quad \text{ou} \quad \left(P + \frac{pL}{2}\right) L = \frac{RI}{n}, \qquad (1)$$

et $$\frac{PL^3}{3} + \frac{pL^4}{8} = EIf \quad \text{ou} \quad \left(\frac{P}{3} + \frac{pL}{8}\right) L^3 = EIf. \qquad (2)$$

En remplaçant n et I par les valeurs qui conviennent aux sections des pièces, on obtient des formules analogues à celles des n°s 399 et 408; ainsi, pour une pièce à section rectangulaire, on a :

$$\left(P + \frac{pL}{2}\right) L = \frac{Rbh^2}{6},$$

et $$\left(\frac{P}{3} + \frac{pL}{8}\right) L^3 = \frac{Ebh^3f}{12}, \quad \text{d'où} \quad f = \frac{12\left(\frac{P}{3} + \frac{pL}{8}\right) L^3}{Ebh^3}.$$

Pour une section faite en m (*fig.* 118), le moment fléchissant et l'effort tranchant ont pour expressions :

$$\mu = P(L - x) + \frac{p(L - x)^2}{2} \quad \text{et} \quad T = P + p(L - x) \quad (\textit{dérivée de } \mu).$$

Si la pièce encastrée par une de ses extrémités est chargée de poids isolés P', P'', P''', etc., distants de l'encastrement de l', l'', l''', etc., on remplacera dans les formules précédentes PL par la somme :

$$P'l' + P''L'' + \ldots..$$

ce qui donnera le moment fléchissant au point d'encastrement :

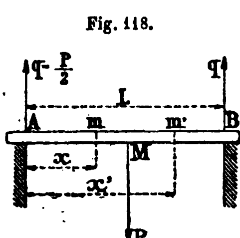
$$\mu = P'l' + P''l'' + P'''l''' = R\,\frac{I}{n}.$$

C'est d'après cette expression qu'il faudra calculer la section d'encastrement.

410. **Pièce reposant sur deux appuis placés à ses extrémités.** Sup-

posons d'abord qu'on puisse négliger le poids de la pièce, et qu'elle soit chargée d'un poids P placé au milieu de sa longueur (*fig.* 118). Dans ce cas, la pièce travaillant comme si elle était encastrée au milieu de sa longueur et sollicitée à chacune de ses extrémités par une force égale à $\frac{P}{2}$, toutes les formules posées au n° 399 se reproduiront; seulement P sera remplacé par $\frac{P}{2}$ et L par $\frac{L}{2}$; ainsi, pour une pièce prismatique, les deux formules (1) et (2) deviennent, en conservant aux lettres les mêmes significations :

Fig. 118.



$$\mu = \frac{PL}{4} = \frac{RI}{n}, \quad (1) \qquad \text{et} \qquad \frac{PL^3}{48} = \text{EI}f. \quad (2)$$

Comparant ces formules avec celles (1) et (2) obtenues au n° 399, on voit qu'une même pièce porte, dans le cas où elle repose sur deux appuis au milieu de sa longueur, une charge quatre fois plus grande que quand elle est seulement encastrée par une extrémité et chargée à l'autre, et que, pour un même poids, la flèche est seize fois plus petite.

Remplaçant *n* et I par les valeurs qui conviennent aux sections transversales des pièces, on obtiendra des formules analogues à celles du n° 399; ainsi, pour une pièce à section rectangulaire, on a :

$$\mu = \frac{PL}{4} = \frac{Rbh^2}{6},$$

et

$$\frac{PL^3}{48} = \frac{Ebh^3f}{12}, \quad \text{d'où} \quad f = \frac{PL^3}{4Ebh^3}.$$

Pour les pièces à section carrée de côté *c*, il vient, en faisant $b = h = c$,

$$P = \frac{2Rc^3}{3L} \quad \text{et} \quad f = \frac{PL^3}{4Ec^4}.$$

C'est au moyen de ces dernières formules que nous avons calculé les valeurs de P et de f du tableau suivant. La formule donne la flèche f en mètres, mais elle est écrite en millimètres dans le tableau.

La première de ces dernières formules montre que P varie simplement en raison inverse de L.

De ces formules on tire respectivement :

$$c = \sqrt[3]{\frac{3PL}{2R}} \quad \text{et} \quad c = \sqrt[4]{\frac{PL^3}{4Ef}},$$

c'est-à-dire le côté *c* en fonction de P et L, ou de P, L et f.

Pour des sections quelconques *m* et *m'* les moments fléchissants et

l'effort tranchant ont pour expressions :

$$\mu = \frac{P}{2}x, \quad \mu' = \frac{P}{2}x' - P\left(x' - \frac{L}{2}\right) \text{ et } T = \frac{P}{2} \text{ (constant).}$$

Note de M. L. A. Barré. Quand la pièce est chargée de poids p_1 égaux entre eux et dont les points d'application divisent la longueur L en parties égales, elle fatigue comme si un poids unique P, qui prend les valeurs suivantes, était appliqué au milieu de L.

Selon que le nombre n des poids p_1 est impair ou pair, on a :

$$P = \frac{n+1}{2n} np_1 \quad \text{ou} \quad P = \frac{n+2}{2(n+1)} np_1.$$

Ayant P, on calcule les dimensions de la pièce à l'aide de la formule ci-dessus (1) qui donne le maximum du moment fléchissant.

Si la charge est uniformément répartie sur toute la longueur de la pièce, p étant la charge par mètre de longueur, la charge totale est pL, dont la moitié est $\frac{pL}{2}$, et les formules (1) et (2) (p. 481) deviennent :

$$\mu = \frac{pL^2}{8} = \frac{RI}{n}, \tag{1}$$

et

$$\frac{1}{48} \times \frac{5}{8} pL^4 = EIf, \quad \text{d'où} \quad f = \frac{5pL^4}{384EI}. \tag{2}$$

Ces formules font voir que le poids pL est double de celui porté par la même pièce chargée en son milieu, et que la flèche est les 5/8 de celle produite par le même poids appliqué au milieu de la longueur de la pièce.

Pour une pièce prismatique à section rectangulaire, on a, en remplaçant n et I par les valeurs qui conviennent à cette section :

$$\mu = \frac{pL^2}{8} = \frac{Rbh^2}{6},$$

et

$$\frac{1}{48} \times \frac{5}{8} pL^4 = \frac{Ebh^3 f}{12}, \quad \text{d'où} \quad f = \frac{\frac{5}{8}pL^4}{4Ebh^3} = \frac{5pL^4}{32Ebh^3}.$$

411. Pièce chargée d'un poids P au milieu de sa longueur, et d'une charge uniforme p par mètre sur toute sa longueur. On a :

$$\mu = \left(P + \frac{pL}{2}\right)\frac{L}{4} = \frac{RI}{n}, \tag{1}$$

et

$$\frac{PL^3}{48} + \frac{1}{48} \times \frac{5}{8} pL^4 \quad \text{ou} \quad \left(P + \frac{5}{8}pL\right)\frac{L^3}{48} = EIf. \tag{2}$$

Pour une pièce prismatique à section rectangulaire on a donc, en

remplaçant n et I par leurs valeurs :

$$\left(P + \frac{pL}{2}\right)\frac{L}{4} = \frac{Rbh^2}{6},$$

et $$\left(P + \frac{5}{8}pL\right)\frac{L^3}{48} = \frac{Ebh^3f}{12}, \quad \text{d'où} \quad f = \frac{\left(P = \frac{5}{8}pL\right)L^3}{4Ebh^3}.$$

Le moment fléchissant pour une section faite en m a pour expression (en prenant les moments par rapport à m) *équilibre de* Am :

$$\mu = \left(\frac{P}{2} + \frac{pL}{2}\right)x - \frac{px^2}{2}, \qquad \text{(A)}$$

et pour une section faite en m', on a (par rapport à m') :

$$\mu = \left(\frac{P}{2} + \frac{PL}{2}\right)x' - P\left(x' - \frac{L}{2}\right) - \frac{px'^2}{2}. \qquad \text{(B)}$$

Remarque. Si dans les deux dernières formules (A) et (B), on fait $x = \frac{L}{2}$ et $x' = \frac{L}{2}$, on obtient le moment fléchissant maximum en M, donné par la relation (2) du n° 411. Les relations (A) et (B) permettront de construire la courbe des moments fléchissants, dont l'ordonnée en chaque point m sera proportionnelle au moment fléchissant de la section transversale en ce point m. Par suite, si la pièce soumise à la flexion est en métal (fer ou fonte), on pourra proportionner économiquement sa section suivant la valeur du moment fléchissant, en s'imposant la condition que le coefficient de sécurité R ne dépasse pas une valeur donnée. A cet effet, on écrira pour chaque section m (*fig.* 118) :

$$\mu = \frac{RI}{n},$$

d'où l'on déterminera $\frac{I}{n}$ et, par suite, la section nécessaire en m.

Cette considération conduirait à réduire à zéro la section de la poutre aux points d'appui A et B, puisque pour ces points le moment fléchissant est zéro. Mais pour ces points l'effort tranchant a pour valeur :

$$T = P + \frac{pL}{2} = \omega R',$$

en appelant ω la section de la poutre en A, et en désignant par R' le coefficient de cisaillement que l'on peut prendre égal aux 4/5 du coefficient R de sécurité (à l'extension et à la compression).

412. Tableau des poids P dont on peut charger en leur milieu les poutres en bois reposant sur deux appuis, placés à leurs extrémités, et des flèches f que ces poutres subissent sous l'action des poids P (410), la longueur de la poutre, ou la distance des appuis, étant L, et sa section étant un carré de côté c. Nous avons adopté 1 200 000 000 pour le coefficient d'élasticité E et 600 000 pour le coefficient de sécurité R (360 et 364 par mètre carré). Nous avons négligé le poids de la poutre, ce que l'on peut faire tant que le rapport de L à c ne dépasse pas une certaine limite.

L=		1m,00	1m,50	2m,00	2m,50	3m,00	3m,50	4m,00	4m,50	5m,00	5m,50	6m,00	7m,00	8m,00	9m,00	10m,00
c	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,08	P	205	137	102	82	68	58	51								
	f	1,04	2,35	4,15	6,52	9,34	12,65	16,60								
0,09	P	292	194	146	117	97	83	73								
	f	0,93	2,08	3,71	5,80	8,32	11,30	14,83								
0,10	P	400	267	200	160	133	114	100	89	80						
	f	0,83	1,88	3,33	5,21	7,48	10,18	13,33	16,90	20,83						
0,11	P	532	355	266	213	177	152	133	118	106						
	f	0,76	1,70	2,98	4,74	6,80	9,27	12,11	15,30	18,85						
0,12	P	691	461	346	276	230	197	173	154	138	126	115				
	f	0,69	1,56	2,78	4,33	6,24	8,49	11,13	14,10	17,33	21,06	24,96				
0,13	P	879	586	439	352	293	251	220	195	176	160	146				
	f	0,64	1,44	2,56	4,01	5,77	7,85	10,27	12,96	16,05	19,42	23,00				
0,14	P	1098	732	549	439	366	314	274	244	220	200	183				
	f	0,60	1,34	2,38	3,72	5,36	7,30	9,51	12,06	14,91	18,05	21,44				
0,15	P	1350	900	675	540	450	386	338	300	270	245	225	193	169		
	f	0,56	1,25	2,22	3,47	5,00	6,81	8,90	11,25	13,89	16,77	20,00	27,24	35,61		
0,16	P	1638	1092	819	655	546	468	410	364	328	298	273	234	205		
	f	0,52	1,17	2,08	3,26	4,69	6,38	8,33	10,55	13,02	15,76	18,75	25,52	33,33		
0,17	P	1965	1310	983	786	655	561	491	437	393	357	328	281	246		
	f	0,49	1,10	1,96	3,06	4,41	6,00	7,84	9,93	12,25	14,83	17,65	24,02	31,37		
0,18	P	2333	1555	1166	933	778	667	583	518	467	424	389	333	292	259	
	f	0,46	1,04	1,85	2,89	4,17	5,67	7,41	9,38	11,57	14,00	16,67	22,69	29,63	37,50	
0,19	P	2744	1829	1372	1097	915	784	686	610	549	499	457	392	343	305	
	f	0,44	0,99	1,75	2,74	3,95	5,37	7,02	8,88	10,96	13,27	15,79	21,49	28,07	35,53	
0,20	P	3200	2133	1600	1280	1067	914	800	711	640	582	533	457	400	355	
	f	0,42	0,91	1,67	2,60	3,75	5,10	6,67	8,44	10,42	12,60	15,00	20,42	26,67	33,75	
0,21	P	3704	2469	1852	1482	1235	1058	926	823	741	673	617	529	463	412	
	f	0,40	0,89	1,59	2,48	3,57	4,86	6,35	8,04	9,92	12,00	14,29	19,44	25,40	32,14	
0,22	P	4259	2839	2130	1704	1420	1217	1065	946	852	774	710	608	532	473	426
	f	0,38	0,85	1,52	2,37	3,41	4,64	6,06	7,67	9,47	11,46	13,64	18,56	24,24	30,68	37,88
0,23	P	4867	3245	2433	1947	1622	1391	1217	1082	973	885	811	695	608	541	487
	f	0,36	0,82	1,45	2,26	3,26	4,44	5,80	7.34	9,06	10,96	13,04	17,75	23,24	29,35	36,23
0,24	P	5530	3686	2765	2212	1843	1580	1382	1229	1106	1005	922	790	691	614	553
	f	0,35	0,78	1,39	2,17	3,13	4,25	5,56	7,03	8,68	10,50	12,50	17,01	22,22	28,13	34,72
0,25	P	6250	4167	3125	2500	2083	1786	1562	1388	1250	1136	1042	893	781	694	625
	f	0,33	0,75	1,33	2,08	3,00	4,08	5,33	6,75	8,33	10,08	12,00	16,33	21,33	27,00	33,33
0,26	P	7030	4687	3515	2812	2343	2009	1758	1562	1406	1278	1172	1004	879	781	703
	f	0,32	0,72	1,28	2,00	2,89	3,93	5,13	6,49	8,01	9,70	11,54	15,71	20,51	25,96	32,05
0,27	P	7873	5249	3937	3149	2624	2249	1968	1750	1575	1431	1312	1125	984	875	787
	f	0,31	0,69	1,23	1,93	2,78	3,78	4,94	6,25	7,72	9,34	11,11	15,12	19,75	25,00	30,86
0,28	P	8781	5854	4390	3512	2927	2509	2195	1951	1756	1597	1463	1254	1098	976	878
	f	0,30	0,67	1,19	1,86	2,68	3,65	4,76	6,03	7,44	9,00	10,71	14,58	19,05	24,11	29,76
0,29	P	9756	6504	4878	3902	3252	2787	2439	2168	1951	1774	1626	1394	1219	1084	976
	f	0,29	0,65	1,15	1,80	2,59	3,52	4,60	5,82	7,18	8,69	10,34	14,08	18,39	23,28	28,74
0,30	P	10800	7200	5400	4320	3600	3086	2700	2400	2160	1963	1800	1543	1350	1200	1080
	f	0,28	0,63	1,11	1,74	2,50	3,40	4,44	5,63	6,94	8,40	10,00	13,61	17,78	22,50	27,78
0,31	P	11916	7944	5958	4767	3972	3405	2979	2648	2383	2167	1986	1702	1490	1324	1192
	f	0,27	0.60	1,08	1,68	2,42	3,29	4,30	5,44	6,72	8,13	9,68	13,17	17,20	21,77	26,88
0,32	P	13107	8738	6554	5243	4369	3745	3277	2913	2621	2383	2185	1872	1638	1456	1311
	f	0,26	0,59	1,04	1,63	2,34	3,19	4,17	5,27	6,51	7,88	9,38	12,76	16,67	21,09	26,04
0,33	P	14375	9583	7187	5750	4792	4107	3594	3194	2875	2614	2396	2053	1797	1597	1437
	f	0,25	0,57	1,01	1,58	2,27	3,09	4,04	5,11	6,31	7,64	9,09	12,37	16,16	20,45	25,25
0,34	P	15722	10481	7861	6289	5241	4492	3930	3494	3144	2858	2620	2246	1965	1747	1572
	f	0,25	0,55	0,98	1,53	2,21	3,00	3,92	4,96	6,13	7,41	8,82	12,01	15,69	19,83	24,51
0,35	P	17150	11433	8575	6860	5717	4900	4288	3811	3430	3118	2858	2450	2144	1906	1715
	f	0,24	0,54	0,95	1,49	2,14	2,92	3,81	4,82	5,95	7,20	8,57	11,67	15,24	19,29	23,81
0,36	P	18662	12442	9331	7465	6221	5332	4666	4147	3732	3393	3110	2666	2333	2074	1866
	f	0,23	0,52	0,93	1,45	2,08	2,84	3,70	4,69	5,79	7,00	8,33	11,34	14,81	18,75	23,15
0,37	P	20261	13507	10131	8104	6754	5789	5065	4502	4052	3684	3377	2894	2533	2251	2026
	f	0,23	0,51	0,90	1,41	2,03	2,76	3,60	4,56	5,63	6,81	8,11	11,04	14,41	18,24	22,52
0,38	P	21949	14633	10974	8780	7316	6271	5487	4878	4390	3991	3658	3136	2744	2439	2195
	f	0.22	0,49	0,88	1,37	1,97	2,69	3,51	4,44	5,48	6,63	7,89	10,75	14,04	17,76	21,93
0,39	P	23728	15818	11864	9491	7909	6779	5932	5273	4746	4314	3955	3390	2966	2636	2373
	f	0,21	0,48	0,85	1,34	1,92	2,62	3,42	4,33	5,34	6,46	7,69	10,47	13,68	17,31	21,37

L= c		1m,00	2m,00	3m,00	4m,00	5m,00	6m,00	7m,00	8m,00	9m,00	10m,00	11m,00	12m,00	13m,00	14m,00	15m,00
0,40	P	25600	12800	8533	6400	5120	4267	3657	3200	2844	2560	2327	2133			
	f	0,21	0,83	1,88	3,33	5,21	7,50	10,21	13,36	16,88	20,83	25,21	30,00			
0,41	P	27568	13784	9190	6892	5514	4595	3938	3446	3063	2757	2506	2297			
	f	0,20	0,81	1,83	3,25	5,08	7,32	9,96	13,01	16,46	20,33	24,59	29,27			
0,42	P	29635	14818	9878	7409	5927	4939	4234	3704	3293	2964	2694	2470			
	f	0,20	0,79	1,79	3,17	4,96	7,14	9,72	12,70	16,07	19,84	24,01	28,57			
0,43	P	31803	15901	10601	7951	6361	5300	4543	3975	3534	3180	2891	2650			
	f	0,19	0,78	1,74	3,10	4,85	6,98	9,50	12,40	15,70	19,38	23,45	27,91			
0,44	P	34074	17037	11358	8518	6815	5679	4868	4259	3786	3407	3098	2840			
	f	0,19	0,76	1,70	3,03	4,73	6,82	9,2[illegible]	12,12	15,34	18,94	22,92	27,27			
0,45	P	36450	18225	12150	9113	7290	6075	5207	4556	4050	3645	3314	3038	2803		
	f	0,19	0,74	1,67	2,96	4,63	6,67	9,07	11,85	15,00	18,52	22,41	26,67	31,30		
0,46	P	38934	19467	12978	9734	7787	6489	5562	4867	4326	3893	3540	3245	2995		
	f	0,18	0,72	1,63	2,90	4,53	6,52	8,88	11,59	14,67	18,12	21,92	26,09	30,62		
0,47	P	41529	20765	13843	10382	8306	6922	5933	5191	4614	4153	3775	3461	3194		
	f	0,18	0,71	1,60	2,84	4,43	6,38	8,69	11,35	14,36	17,73	21,45	25,53	29,97		
0,48	P	44237	22118	14746	11059	8847	7373	6320	5530	4915	4424	4022	3686	3402		
	f	0,17	0,69	1,56	2,78	4,34	6,25	8,51	11,11	14,06	17,36	21,01	25,00	29,34		
0,49	P	47060	23530	15687	11765	9412	7843	6723	5882	5229	4706	4278	3922	3620		
	f	0,17	0,68	1,53	2,72	4,25	6,12	8,33	10,88	13,78	17,01	20,58	24,49	28,74		
0,50	P	50000	25000	16667	12500	10000	8333	7143	6250	5556	5000	4545	4167	3846	3571	
	f	0,17	0,67	1,50	2,67	4,17	6,00	8,17	10,67	13,50	16,67	20,17	24,00	28,17	32,67	
0,51	P	53060	26530	17687	13265	10612	8843	7580	6633	5896	5306	4824	4422	4081	3790	
	f	0,16	0,65	1,47	2,61	4,09	5,88	8,01	10,46	13,24	16,34	19,77	23,53	27,62	32,03	
0,52	P	56243	28122	18748	14061	11249	9374	8035	7030	6249	5624	5113	4687	4326	4017	
	f	0,16	0,64	1,44	2,56	4,01	5,77	7,85	10,26	12,98	16,02	19,39	23,08	27,09	31,41	
0,53	P	59551	29775	19850	14888	11910	9925	8507	7444	6617	5955	5414	4963	4580	4253	
	f	0,16	0,63	1,41	2,52	3,93	5,66	7,70	10,06	12,74	15,72	19,92	22,64	26,57	30,82	
0,54	P	62936	31493	20995	15746	12597	10498	8998	7873	6998	6299	5726	5249	4845	4499	
	f	0,15	0,62	1,39	2,47	3,86	5,56	7,56	9,88	12,50	15,43	18,67	22,22	26,08	30,25	
0,55	P	66550	33275	22183	16638	13310	11092	9507	8319	7394	6655	6050	5546	5119	4753	4437
	f	0,15	0,61	1,36	2,42	3,79	5,45	7,42	9,70	12,27	15,15	18,33	21,82	25,61	29,70	34,09
0,56	P	70246	35123	23415	17562	14049	11708	10035	8781	7805	7025	6386	5854	5403	5017	4683
	f	0,15	0,60	1,34	2,38	3,72	5,36	7,29	9,52	12,05	14,88	18,01	21,43	25,15	29,17	33,48
0,57	P	74077	37039	24692	18519	14815	12346	10582	9260	8231	7408	6734	6173	5698	5291	4938
	f	0,15	0,58	1,32	2,34	3,65	5,26	7,16	9,36	11,84	14,62	17,89	21,30	24,71	28,66	32,89
0,58	P	78045	39022	26015	19511	15609	13007	11149	9756	8672	7804	7095	6304	6003	5574	5203
	f	0,14	0,57	1,29	2,30	3,59	5,17	7,04	9,20	11,64	14,37	17,38	20,69	24,28	28,16	32,33
0,59	P	82152	41076	27384	20538	16430	13692	11736	10269	9128	8215	7468	6846	6319	5868	5477
	f	0,14	0,56	1,27	2,26	3,53	5,08	6,92	9,04	11,44	14,12	17,09	20,34	23,87	27,69	31,78
0,60	P	86400	43200	28800	21600	17280	14400	12343	10800	9600	8640	7855	7200	6646	6171	5760
	f	0,14	0,56	1,25	2,22	3,47	5,00	6,81	8,89	11,25	13,89	16,81	20,00	23,47	27,23	31,25
0,61	P	90792	45396	30264	22698	18159	15132	12970	11349	10088	9079	8254	7566	6984	6485	6053
	f	0,14	0,55	1,23	2,19	3,42	4,92	6,69	8,74	11.07	13,66	16,53	19,67	23,09	26,78	30,74
0,62	P	95331	47666	31777	23833	19066	15889	13619	11916	10392	9533	8666	7944	7333	6809	6355
	f	0,13	0,54	1,21	2,15	3,36	4,84	6,59	8,60	10,89	13,44	16,26	19,35	22,72	26,35	30,24
0,63	P	»	50009	33340	25005	20004	16670	14288	12502	11113	10002	9093	8335	7693	7144	6668
	f	»	0,53	1,19	2,12	3,31	4,76	6,48	8,47	10,71	13,23	16,01	19,05	22,36	25,93	29,76
0,64	P	»	52429	34953	26214	20972	17476	14980	13107	11651	10486	9533	8738	8066	7490	6991
	f	»	0,52	1,17	2,08	3,26	4,69	6,38	8,33	10,55	13,02	15,76	18,75	22,01	25,52	29,30
0,65	P	»	54925	36617	27463	21970	18308	15693	13731	12206	10985	9986	9154	8450	7846	7323
	f	»	0,52	1,15	2,05	3,21	4,62	6,28	8,21	10,38	12,82	15,51	18,46	21,67	25,13	28,85
0,66	P	»	57499	38333	28750	23000	19166	16428	14375	12778	11500	10454	9583	8846	8214	7667
	f	»	0,51	1,14	2,02	3,16	4,55	6,19	8,08	10.23	12,63	15,28	18,18	21,34	24,75	28,41
0,67	P	»	60153	40102	30076	24061	20051	17186	15038	13367	12031	10937	10025	9254	8593	8020
	f	»	0,50	1,12	1,99	3,11	4,48	6,09	7,96	10,07	12,44	15,05	17,91	21,02	24,38	27,98
0,68	P	»	62886	41924	31443	25155	20962	17968	15722	13975	12577	11434	10481	9675	8984	8385
	f	»	0,49	1,10	1,96	3,06	4,41	6,00	7,84	9,93	12,25	14,83	17,65	20,71	24,02	27,57
0,69	P	»	65702	43801	32851	26281	21901	18772	16425	14600	13140	11946	10950	10108	9386	8760
	f	»	0,48	1,09	1,93	3,02	4,35	5,92	7,73	9,78	12,08	14,61	17,39	20,41	23,67	27,17
0,70	P	»	68600	45733	34300	27440	22867	19600	17150	15244	13720	12473	11433	10554	9800	9147
	f	»	0,48	1,07	1,90	2,98	4,29	5,83	7,62	9,64	11,90	14,40	17,14	20,12	23,33	26,79

413. Applications du tableau précédent. Cas où la pièce repose librement sur deux appuis placés à ses extrémités (page 484).

1° Une poutre d'une longueur L = 4 mètres entre ses appuis est chargée en son milieu d'un poids P = 800 kilog.; quel doit être le côté c de sa section, qui est carrée, et quelle flèche f prend cette pièce, en négligeant le poids de celle-ci?

La tableau donne directement $c = 0^m,20$ et $f = 6^{mm},67$.

Pour une longueur $L = 4^m,10$ et un poids P = 860 kilog., la table montre que c est compris entre $0^m,20$ et $0^m,21$, limites des valeurs qu'on pourra alors adopter sans inconvénient dans la pratique. La formule du n° 410 donne pour la valeur exacte de c :

$$c = \sqrt[3]{\frac{3PL}{2R}} = \sqrt[3]{\frac{3 \times 860 \times 4,10}{2 \times 600\,000}} = 0^m,2965.$$

2° Pour L = 4 mètres et P = 600 kilog., si la section transversale de la pièce est un rectangle dont la hauteur h est à la base b dans le rapport de 4 à 3, cette pièce travaille dans les mêmes conditions qu'une pièce de même longueur L = 4 mètres, d'une section carrée dont le côté $c = h$, et chargée en son milieu d'un poids $P = 600 \times \frac{4}{3} = 800$ kilog.

Cela établi, d'après le 1° on a $h = 0^m,20$, puis $b = 0^m,20 \times \frac{3}{4} = 0,15$.

Quant à la flèche f, elle a évidemment la même valeur $6^{mm},67$ pour les deux poutres.

3° Si la première pièce du 1° et celle du 2° sont respectivement chargées uniformément sur toute leur longueur d'un poids total pL de 1 600 kilog. et de 1 200 kilog., ces poids étant équivalents aux poids uniques $\frac{1\,600}{2} = 800$ kilog. et $\frac{1\,200}{2} = 600$ kilog. appliqués au milieu de la longueur (410), on a d'après le 1° $c = 0^m,20$, et d'après le 2° $h = 0^m,20$ et $b = 0^m,15$.

Quant à la flèche, qui est la même pour les deux pièces, elle est (410) $f = 6,67 \times \frac{5}{8} = 4^{mm},17$.

4° Pour L = 4 mètres entre les appuis, un poids P = 650 kilog. placé au milieu de la longueur de la pièce, et un poids $pL = 300$ kilog. réparti uniformément sur toute cette longueur (ce poids pL peut comprendre celui de la pièce), la poutre fatiguant comme si elle était chargée en son milieu d'un poids unique $650 + \frac{300}{2} = 800$ kilog., si la section est carrée, on a, d'après le 1°, $c = 0^m,20$.

Si P = 450 kilog. et $pL = 300$ kilog., la pièce fatigue comme si elle était chargée en son milieu du poids unique 450 + 150 = 600 kilog., et si la section est un rectangle dont h est à b dans le rapport de 4 à 3, on a, d'après le 2°, $h = 0^m,20$ et $b = 0^m,15$.

Cas où la pièce est encastrée par une de ses extrémités (408).

5° Si le poids P suspendu à l'extrémité de la longueur L = 4 mètres

de la pièce est de 200 kilog., la pièce fatiguant au point d'encastrement comme elle fatiguerait en son milieu si, reposant sur deux appuis, elle était chargée en ce milieu d'un poids de 200 × 4 800 kilog. (410), si la pièce est carrée on a, d'après le 1°, $c = 0^m,20$.

6° Le poids appliqué à l'extrémité de la pièce étant de 150 kilog., si la section est un rectangle dont $h : b = 4 : 3$, la pièce travaille comme une pièce à section carrée de côté $c = h$, supportant à son extrémité un poids de $150 \times \frac{4}{3} = 200$ kilog. On a alors, d'après le 5°, $h = c = 0^m,20$, puis $b = 0^m,20 \times \frac{3}{4} = 0^m,15$.

7° Si la section était un carré, la charge répartie uniformément $pL = 400$ kilog., la pièce travaille au point d'encastrement comme si elle était chargée à son extrémité d'un poids de $\frac{400}{2} = 200$ kilog. (408). Le problème est alors ramené à celui du 5°, et l'on a $c = 0^m,20$.

8° Si la section est un rectangle dont $h : b = 4 : 3$, et que le poids réparti uniformément soit $pL = 300$ kilog., la pièce travaille comme si, étant carrée, elle supportait un poids de $300 \times \frac{4}{3} = 400$ kilog. réparti uniformément. On a alors (7°) $h = c = 0^m,20$, et $b = 0^m,20 \times \frac{3}{4} = 0^m,15$.

9° La section étant un carré, si le poids P appliqué à l'extrémité est de 100 kilog. et le poids pL uniformément réparti de 200 kilog., la pièce travaille au point d'encastrement comme si elle était chargée à son extrémité d'un poids unique $P + \frac{pL}{2} = 100 + 100 = 200$ kilog. (409), et l'on a, d'après le (5°), $c = 0^m,20$.

10° Si la section est un rectangle dont $h : b = 4 : 3$, le poids P étant de 75 kilog. et celui pL de 150 kilog., la pièce travaille comme une pièce à section carrée de $c = h$ de côté, chargée du poids $75 \times \frac{4}{3} = 100$ kilog. appliqué à son extrémité et du poids $150 \times \frac{4}{3} = 200$ kilog. réparti uniformément. Le problème est ainsi ramené à celui du 9°, et l'on a $h = 0^m,20$, puis (8°) $b = 0^m,20 \times \frac{3}{4} = 0^m,15$.

414. Pièce reposant sur deux appuis et portant un poids unique P placé en un point quelconque de sa longueur. On a alors pour la réaction au point A (*fig.* 119) (*équilibre de* Am):

$$q = \frac{Pl'}{L},$$

et pour le moment fléchissant en C :

$$\mu = \frac{Pll'}{L} = \frac{RI}{n}.$$

l et l' distances du point d'application de P aux appuis, $l + l' = L$.

Pour une pièce à section rectangulaire, on a, en remplaçant n et I par leurs valeurs :

$$\frac{Pll'}{L} = \frac{Rbh^2}{6}.$$

Si le poids était appliqué au milieu de L, on aurait $l = l' = \frac{L}{2}$, et cette valeur, substituée dans ces deux dernières formules, reproduirait les formules déjà trouvées pour ce cas au n° 410.

La pièce étant chargée, en outre du poids P placé en un point quelconque C de sa longueur, d'un poids p par mètre courant réparti uniformément, on a pour la réaction en A :

$$q = \frac{Pl'}{L} + \frac{pL}{2}$$

et pour le moment fléchissant en C (*équilibre de* AC) :

$$\mu = \frac{RI}{n} = \left(\frac{Pl'}{L} + \frac{pL}{2}\right) l - \frac{pl^2}{2}.$$

Cette formule donne la valeur du moment fléchissant pour le point d'application du poids P; mais il peut arriver que ce ne soit pas le maximum du moment fléchissant. Dans ce cas, il y a une limite de $\frac{P}{pL}$ à partir de laquelle le maximum a toujours lieu au point d'application de P.

Il est d'ailleurs facile de calculer cette limite du rapport $\frac{P}{pL}$. D'après la figure 119, on a pour la réaction sur l'appui A :

Fig. 119.

$$q = \frac{Pl'}{L} + \frac{pL}{2}. \qquad \text{(A)}$$

Le moment fléchissant, pour une section faite en m, a pour expression, Am étant égal à x :

$$\mu = qx - \frac{px^2}{2}. \qquad \text{(B)}$$

La valeur maximum du moment fléchissant répond à la dérivée de (B) égalée à zéro ; ce qui donne :

$$\frac{d\mu}{dx} = q - px = 0,$$

d'où :

$$x = \frac{q}{p}. \qquad \text{(C)}$$

Cette valeur est seulement applicable lorsqu'elle est plus petite

que $AC = l$, ou lorsqu'elle est au plus égale à AC; on doit donc poser la condition :

$$\frac{q}{p} \leq l,$$

d'où l'on déduit successivement en remplaçant q par sa valeur (A) :

$$\frac{Pl'}{L} + \frac{pL}{2} < pl,$$

$$\frac{Pl'}{L} < pl - \frac{pL}{2} = p\left(l - \frac{L}{2}\right),$$

$$\frac{P}{pL} \leq \frac{1}{l'}\left(l - \frac{L}{2}\right).$$

Or la figure 119 donne (M étant le milieu de la portée L :

$$l - \frac{L}{2} = l - AM = d.$$

On peut écrire la dernière relation de cette manière :

$$\frac{P}{pL} \leq \frac{d}{l'}. \qquad \text{(D)}$$

Telle est la limite du rapport de la charge isolée P à la charge uniforme; limite qu'il faut interpréter ainsi :

1° Si l'on a :

$$\frac{P}{pL} \leq \frac{d}{l'},$$

le maximum du moment fléchissant et la section de rupture sont en m, c'est-à-dire entre le point C et le milieu M de la portée;

2° Si l'on a :

$$\frac{P}{pL'} = \frac{d}{l'},$$

le maximum du moment fléchissant et la section de rupture sont en C;

3° Si

$$\frac{P}{pL} > \frac{d}{l'},$$

on a en même temps $x > l$; cette valeur n'est pas applicable et l'on fait x aussi grand que possible en prenant $x = l = AC$. Le maximum du moment fléchissant est en C.

Les exemples suivants permettront de se rendre compte des cas particuliers :

1[er] *Exemple. Données :* $L = 10$ mètres; $l = 6$ mètres; $l' = 4$ mètres; $P = 1\,200$ kilog.; $p = 1\,000$ kilog. Le calcul donne :

$$q = 5\,480 \text{ kilog.}$$

$$x = \frac{q}{p} = \frac{5\,480}{p} = 5^m,48 < AC.$$

Cette valeur est applicable. On obtiendra le maximum du moment fléchissant en remplaçant x par sa valeur $5^m,48$ dans l'équation (B), ce qui donne :

$$\mu = 15\,029.$$

On peut vérifier que la condition (D) est satisfaite.

2ᵉ *Exemple. Données :* $P = 1\,250$ kilog., $p = 500$ kilog. Le calcul donne :

$$q = 3\,000 \text{ kilog.},$$

$$x = \frac{q}{p} = 6 \text{ mètres} = AC.$$

Le maximum du moment fléchissant et la section de rupture sont en C; ce qui donne $\mu = 9\,000$.

La condition (D) est satisfaite.

3ᵉ *Exemple. Données :* $P = 1\,800$ kilog., $p = 600$ kilog. Le calcul donne :

$$q = 3\,720 \text{ kilog.},$$

$$x = \frac{q}{p} = \frac{3\,720}{600} = 6^m,20 > AC,$$

donc cette valeur n'est pas applicable et l'on fera pour le maximum du moment fléchissant x aussi grand que possible en prenant $x = AC$; ce qui donne $\mu = 11\,520$. Le maximum est donc en C. On peut vérifier que la condition (D) n'est pas satisfaite.

415. Pièce prismatique dont une extrémité A est encastrée, tandis que l'autre B repose librement sur un appui. Représentons (*fig.* 119) par :

P un poids placé en un point quelconque de la pièce ;
p une charge par mètre répartie uniformément sur toute la longueur de la pièce ;
L la longueur de la pièce ;
l et l' les distances respectives du point d'application du poids P au point d'encastrement et au point d'appui ;
q' la pression exercée par la pièce sur le point d'appui B.

Pour un point quelconque m pris sur l, on a, en désignant par x sa distance au point d'encastrement, et en supposant que la section de la pièce est rectangulaire (399) (*pour l'équilibre de* mB) :

$$\mu = \frac{RI}{n} = \frac{Rbh^2}{6} = P(l - x) + \frac{p}{2}(L - x)^2 - q'(L - x). \qquad (a)$$

Si le point m est pris sur l' et à une distance x' du point d'encastrement A, le moment fléchissant est, en supposant la pièce à section rectangulaire (*équilibre de* m'B) :

$$\frac{RI}{n} = \frac{Rbh^2}{6} = \frac{p}{2}(L - x')^2 - q'(L - x').$$

On a :

$$q' = \frac{3pL}{8} + \frac{Pl^2}{2L^3}(3L - l).$$

Suivant que P ou p sera nul, la valeur de q' se réduira respectivement au premier ou au deuxième terme du second membre de cette équation; ainsi supposant $P=0$, on a au point B :

$$q'=\frac{3pL}{8} \text{ et } q=\frac{5}{8}pL,$$

et la formule (a) devient :

$$\frac{RI}{n}=\frac{Rbh^2}{6}=\frac{p}{2}(L-x^2)-\frac{3pL}{8}(L-x)=\frac{p}{2}(L-x)\left(\frac{L}{4}-x\right). \quad (b)$$

Ce qui fait voir que pour les points qui donnent $x=L$ et $x=\frac{L}{4}$, le moment fléchissant est nul; ce dernier point est celui d'inflexion de la pièce : c'est le point analogue au point M (*fig.* 120). Le point de plus grande flexion, c'est-à-dire le point où la flèche est la plus grande, est à une distance $x=\frac{5}{8}L$ du point d'encastrement. Cette valeur de x, substituée dans la formule (b), donne :

$$\frac{RI}{n}=\frac{Rbh^2}{6}=\frac{9}{128}pL^2.$$

La formule (b) fait voir aussi que le moment fléchissant est d'autant plus grand que x est plus petit, et que pour $x=0$, c'est-à-dire pour le point d'encastrement A, on a :

$$\frac{RI}{n}=\frac{Rbh^2}{6}=\frac{pL^2}{8}=\frac{16}{128}pL^2.$$

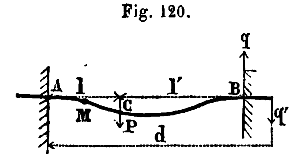
Cette valeur de $\frac{RI}{n}$, comparée à la précédente, fait voir qu'une pièce prismatique fatigue plus au point d'encastrement A qu'au point même de plus grande flèche.

La plus grande flèche est donnée par la formule :

$$EIf=0{,}0054\,pL^4, \quad \text{d'où} \quad f=\frac{0{,}0054\,pL^4}{EI}.$$

416. Pièce encastrée à ses deux extrémités. Soient (*fig.* 120) :

Fig. 120.



P un poids placé en un point quelconque C de la portée;

p une charge par mètre répartie uniformément sur toute la longueur de la pièce;

$L=l+l'$ la longueur de la pièce entre les encastrements;

l et l' les distances respectives du point C aux points d'encastrement A et B.

q et q' les forces verticales capables de produire le même effet que l'encastrement, c'est-à-dire de maintenir horizontal l'élément B de la pièce;

d la distance de l'encastrement A à l'extrémité opposée de la pièce;

x la distance horizontale d'un point quelconque de la partie AC au point A;

x' la distance horizontale d'un point queconqne de CB au point A.

On a, pour un point M pris sur AC (*équilibre de* BM) :

$$\mu = \frac{RI}{n} = P(l - x) + \frac{p}{2}(L - x)^2 - q(L - x) + q'(d - x). \quad (a)$$

Si le point est pris sur CB, on a pour l'équilibre de BM' :

$$\mu = \frac{RI}{n} = \frac{p}{2}(L - x')^2 - q(L - x') + q'(d - x').$$

Pour une pièce rectangulaire, on a : $\frac{RI}{n} = \frac{Rbh^2}{6}$.

Lorsque $x = x' = l$, les deux valeurs précédentes du moment fléchissant deviennent égales; ce qui doit être, puisqu'alors x et x' se rapportent au même point C de la poutre.

On en déduit : $$\frac{qL^2}{2} - q'L\left(d - \frac{L}{2}\right) = \frac{pL^3}{6} + \frac{Pl^2}{2}, \quad (b)$$

et $$\frac{qL^3}{3} + \frac{q'L^2}{2}\left(d - \frac{L}{3}\right) = \frac{pL^4}{8} + \frac{Pl^2}{2}\left(L - \frac{l}{3}\right). \quad (c)$$

Ces deux équations serviront à déterminer q et q'; ainsi de la première on tirera la valeur de q en fonction de q'; on substituera cette valeur dans la deuxième, qui donnera la valeur numérique de q', et cette valeur numérique étant substituée dans la première équation, qui ne renfermera plus que l'inconnue q, on pourra tirer la valeur de cette inconnue.

Dans le cas où p est nul, la formule (a) devient :

$$\frac{RI}{n} = Pl - qL + q'd - (P - q + q')x.$$

Cette équation du premier degré en x fait voir que le point de plus grande fatigue de la pièce est celui pour lequel x a la plus grande valeur l ou la plus petite 0; c'est donc C ou A, points pour lesquels les valeurs respectives S et S' de $\frac{RI}{n}$ deviennent :

$$S = q'd - qL + (q - q')l \qquad \text{et} \qquad S' = Pl - qL + q'd.$$

Faisant $p = 0$ dans les équations (b) et (c), on en conclut :

$$q = \frac{Pl^2(3Ld - 2L^2 + lL - 2ld)}{L^3(d - L)} \qquad \text{et} \qquad q' = \frac{Pl^2(L - l)}{L^2(d - L)}.$$

Les moments S et S' deviennent, en remplaçant q et q' par ces valeurs :

$$S = -\frac{2Pl^2(L - l)^2}{L^3} \qquad \text{et} \qquad S' = \frac{Pl(L - l)^2}{L^2}.$$

Faisant les calculs, on verra quelle sera la plus grande de ces valeurs, d'après laquelle on déterminera les dimensions de la pièce.

Pour avoir les moments fléchissants de la partie CB, il suffit de remplacer l par l' dans les équations précédentes.

Si le poids P *est placé au milieu de la longueur de la pièce*, c'est-à-dire si $l = \frac{L}{2}$, on a :

$$S = S' = \frac{RI}{n} = \frac{PL}{8};$$

ce qui montre que la charge que peut porter la pièce encastrée est double de celle qu'elle porte quand elle repose librement sur deux appuis.

La flèche est donnée par la formule

$$EIf = \frac{PL^3}{192}, \quad \text{d'où} \quad f = \frac{PL^3}{192EI}. \qquad (399)$$

Ce qui apprend que la flèche est quatre fois plus petite que quand la pièce repose simplement sur deux appuis (410).

Pour le point d'inflexion M, on a $x = \frac{L}{4}$.

Quand $P = 0$, *et que la pièce est uniformément chargée d'un poids* p *par mètre de longueur*, des deux équations (b) et (c), on conclut :

$$q = \frac{1}{12}\frac{pL}{(d-L)}(6d - 5L) \qquad \text{et} \qquad q' = \frac{1}{12}\frac{pL^2}{(d-L)}.$$

Ces valeurs, substituées dans la formule (a) où l'on suppose également $P = 0$, donnent :

$$\frac{RI}{n} = \frac{1}{12}p(L^2 - 6Lx + 6x^2) = \frac{p}{2}\left[\left(\frac{L}{2} - x\right)^2 - \frac{L^2}{12}\right].$$

Ce qui donne la valeur maxima du moment fléchissant correspondant à $x = 0$, c'est-à-dire au point A, pour lequel on a par conséquent :

$$\frac{RI}{n} = \frac{pL^2}{12}.$$

On voit que ce moment diminue à mesure que x augmente, et qu'il est égal à 0 quand

$$\left(\frac{L}{2} - x\right)^2 = \frac{L^2}{12}, \text{ c'est-à-dire quand } x = 0{,}212L.$$

A partir de $x = 0{,}212L$, le moment de résistance devient négatif, et sa valeur absolue croît jusqu'au milieu de la portée, point pour lequel $x = \frac{L}{2}$, et par suite :

$$\frac{RI}{n} = \frac{pL^2}{24}.$$

Tout étant symétrique par rapport au milieu de la pièce, au delà de ce point le moment fléchissant repasse par les mêmes valeurs.

La flèche est donnée par la formule :

$$\mathrm{EI}f = \frac{1}{48} \times \frac{1}{8} pL^4, \qquad \text{d'où} \qquad f = \frac{pL^4}{384\mathrm{EI}}.$$

Ainsi la flèche n'est que le 1/5 de celle qui a lieu, pour la même charge, quand la pièce repose librement sur deux appuis.

Dans les constructions, les poutres n'étant, en général, prises dans les murs que de $0^m,30$ à $0^m,50$ au plus, cela ne suffit pas pour produire un encastrement complet, et il est prudent de supposer que les pièces reposent sur deux appuis.

416 *bis*. Résultats d'expériences faites sur les poutres : 1re. Dans les limites de charge où l'élasticité n'est pas altérée, et qui sont celles que supposent les formules précédentes, qu'il convient d'adopter dans la pratique, la fonte et le fer résistant également à l'extension et à la compression, il en résulte que pour les poutres à simple T, il est indifférent de placer la nervure horizontale en dessus ou en dessous. Cependant on pourrait, la pièce reposant sur deux appuis, placer la nervure en dessus ou en dessous suivant que la résistance de la matière à la rupture est plus grande ou plus petite pour l'extension que pour la compression (page 472).

Pour les mêmes raisons, dans les poutres à double T, les nervures doivent être les mêmes dans les limites de la pratique. Cependant, eu égard à ce que la fonte résiste mieux à la rupture par compression que par traction, les ingénieurs anglais, dans les poutres de ponts, donnent à la nervure qui est soumise à l'extension, une étendue plus grande qu'à la nervure supérieure. (*Pont à une seule travée.*)

Les proportions des poutres non symétriques admises comme les plus convenables sont les suivantes :

Épaisseur du corps de la poutre	1
Hauteur totale h de la poutre	19
Épaisseur de la semelle inférieure	2,5
Id. *id.* supérieure	1,2
Largeur totale de la semelle inférieure	15
Id. *id.* supérieure	8,7

Le centre de gravité de la section est à peu près au 1/4 de la hauteur h, en sorte que la plus grande compression des fibres de la semelle supérieure est égale à environ 3 fois la plus grande tension des fibres de la semelle inférieure.

2°. Il est prudent de ne faire travailler les poutres en fonte soumises à des vibrations, comme celles des ponts de chemins de fer, qu'à 1/5 et même à 1/6 de la charge de rupture. La résistance moyenne de la fonte à la rupture par flexion étant 32441000 kilog., on fera dans les formules précédentes R égal à 1/5 ou 1/6 de ce nombre, selon les cas. Des ingénieurs font souvent R = 7500000 pour les pièces ordinaires de machines, R = 3000000 pour les arbres de roues hydrauliques et les poutres de ponts, et R = 2000000 et quelquefois moins pour les ponts de chemins de fer (par mètre carré de section).

Des expériences faites par M. Baumgarten sur des poutres en fonte d'une certaine dimension, et non sur de petits échantillons, ont conduit à des valeurs moindres pour la charge de rupture R et pour le coefficient d'élasticité E; on a obtenu en moyenne R = 27400000 et E = 9595000000. Ces nombres vérifient ceux obtenus pour le viaduc de Tarascon et consignés dans un rapport de MM. Collet-Meygret et Desplaces.

3°. On admet que la flexion des poutres en fonte ne doit pas dépasser 1/600 de la portée, et qu'il conviendrait de la limiter à 1/2000.

4°. Les ingénieurs anglais admettent que la charge d'un pont varie de 5000 à 6555 kilog. par mètre de longueur de paire de rails. La charge d'épreuve excède rarement le 1/3 de celle de rupture.

5°. Des expériences de Fairbairn, il résulte que les flexions sont encore proportionnelles aux charges pour les poutres en fer à double T, et que le coefficient d'élasticité est E = 11502000000 (en moyenne).

Des expériences faites au Conservatoire des arts et métiers sur des poutres en chêne, en sapin, en fer à double T et à semelles égales, en fonte à double T et à semelles égales, et en fonte à double T et à semelles inégales, ont également donné des flexions sensiblement proportionnelles aux charges. Les fers double T ont donné E = 18000000000 environ (par mètre carré).

6°. Des expériences de Fairbairn sur des tubes en tôle ont donné E = 16600000000 jusqu'à la flexion de 1/378 de la portée. Le premier grand tube en tôle du pont de Conway a donné E = 13185000000. Les ingénieurs anglais admettent que la résistance de la tôle à la rupture est, par mètre carré, 28680000 kilog. pour la traction, et 23290000 kilog. pour la compression, nombres qui sont sensiblement dans le rapport de 5 à 4. Dans la pratique, on peut considérer ces deux résistances égales et prendre R = 6000000 de kilog. pour le coefficient de sécurité.

Aujourd'hui, un grand nombre de constructeurs adoptent pour le coefficient de sécurité des fers laminés pour planchers et combles, 8 et même 10 kilog. par millimètre carré.

417. Solides d'égale résistance. Quand une pièce est encastrée par une extrémité et chargée à l'autre d'un poids P, le moment de cette force P, en un point quelconque, est d'autant plus petit que ce point est plus éloigné de l'encastrement; de là il résulte que, pour ne pas employer de matière inutile, les sections transversales de la pièce doivent aller en diminuant depuis l'encastrement jusqu'au point d'application du poids, point où la section devient nulle. Il en est de même si la charge est uniforme. Des considérations analogues sont applicables à une pièce reposant sur deux appuis : la section peut diminuer depuis le milieu de la portée jusqu'aux appuis extrêmes.

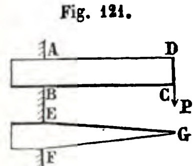
En général, une pièce est dite d'égale résistance lorsque l'effort maxima extension ou compression est le même dans toutes les sections transversales.

La formule $PL = \frac{Rbh^2}{6}$, donnée pour une pièce rectangulaire encas-

trée à une seule extrémité (399), est applicable à une section quelconque de la pièce; alors, supposant que la hauteur h reste constante, et résolvant l'équation par rapport à b, on a, pour une valeur quelconque l de L, en considérant R comme constant :

$$b = \frac{6P}{Rh^2} l.$$

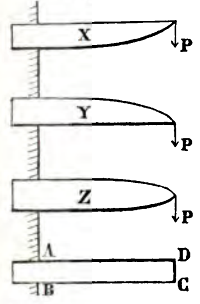
Fig. 121.



Ce qui fait voir que la largeur horizontale b du solide est proportionnelle à l. Ainsi, le solide étant représenté en élévation par le rectangle ABCD (*fig.* 121), dont la dimension $AB = h$, il l'est en plan par le triangle EFG.

Supposant au contraire que la largeur b reste constante, et résolvant l'équation par rapport à h, on a, pour une valeur quelconque l de L :

Fig. 122.



$$h^2 = \frac{6P}{Rb} l,$$

c'est-à-dire que le carré de la hauteur h est proportionnel à l. Il en résulte que la pièce étant représentée en plan par le rectangle ABCD (*fig.* 122), dont la dimension $AB = b$, l'est en élévation par l'une quelconque des trois formes paraboliques X, Y, Z, dont le sommet est au point d'application de la force P.

On pourrait aussi faire varier à la fois la hauteur h de la pièce et sa largeur horizontale b suivant une loi déterminée, par exemple en s'imposant la condition que toute section transversale soit un carré.

Pièce reposant sur deux appuis. On prendra dans le cas d'une charge isolée P, au milieu de sa longueur, pour le moment fléchissant :

$$\mu = \frac{P}{2} x = \frac{RI}{n},$$

et en admettant un profil rectangulaire de base b et de hauteur h, on écrira :

$$\frac{P}{2} x = R \frac{bh^2}{6}.$$

Si l'on fait varier la hauteur h en prenant b constant, chaque moitié de la pièce présentera dans le sens de sa longueur la forme d'une parabole, que l'on pourra construire au moyen de l'équation précédente, dans laquelle R est constant.

Si l'on prend la hauteur h constante et la base horizontale b variable, celle-ci sera proportionnelle à x; par conséquent, la pièce aura en plan la forme d'un losange, la partie renflée étant au milieu.

Théoriquement, les extrémités d'une telle poutre satisfaisant à une

valeur constante du coefficient R, se réduiraient à une droite verticale. Pratiquement, il ne peut en être ainsi, puisque les sections extrêmes (sur les appuis) doivent être suffisantes pour résister à l'effort tranchant qui est égal, dans le cas actuel, à la moitié de la charge P, et d'autre part, les poutres reposent sur les murs d'une certaine quantité.

Cas d'une pièce posée sur deux appuis et chargée uniformément. Le moment fléchissant a pour valeur (410) :

$$\mu = \frac{pL}{2}x - \frac{px^2}{2} R = \frac{I}{n}.$$

Pour une section transversale rectangulaire du solide, on écrira :

$$\frac{pL}{2}x - \frac{px^2}{2} R = \frac{bh^2}{6}.$$

Si la base b du profil transversal est constante, sa hauteur h est l'ordonnée d'une ellipse que l'on pourra construire par points au moyen de l'équation précédente.

En exécution, on pourra adopter pour la forme de la poutre, dans le sens de sa longueur, une demi-ellipse, soit à la partie supérieure, soit à la partie inférieure, ou même une ellipse, en dédoublant les ordonnées.

Le tracé théorique réduirait la poutre à ses extrémités à des arêtes horizontales. On sera conduit à modifier quelque peu ce tracé, afin de satisfaire à l'effort tranchant et aussi à la nécessité matérielle de faire reposer les poutres sur les murs d'une certaine quantité.

Remarque concernant les solives ou poutres dites d'égale résistance. Lorsqu'il s'agit de solives en bois, la question du profil économique n'a presque plus d'importance parce qu'il faut toujours tirer les pièces rectangulaires d'arbres à peu près cylindriques. On sait que pour un arbre d'un diamètre $D = 2R$, le prisme de plus grande résistance à la flexion que l'on puisse en tirer a pour section un rectangle inscrit ayant pour base $b = \frac{2}{3} R\sqrt{3}$ et pour hauteur $h = 1,4b$ (ou exactement $h = b\sqrt{2}$). Pour les solives, les arbalétriers, les chevrons, etc., le rapport de b à h peut être pris égal à $\frac{1}{4}, \frac{1}{3}, \frac{2}{3}, \frac{3}{4}$, etc., ou même 1, suivant les applications. Pour les pièces métalliques, il en est tout autrement; le profil est à notre disposition, et l'on peut faire varier les profils à nervures, à double T, etc., suivant la valeur du module de section $\left(\frac{I}{n}\right)$. *Voir note* (411). Toutefois, pour les fers laminés, le profil est imposé et reste nécessairement constant. Il y a, en certains points, excès de matière.

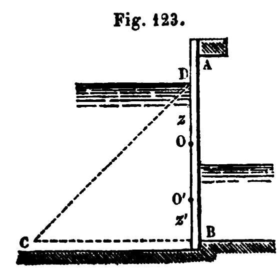
Nous donnons ci-après les éléments principaux (concernant les solides ou poutres continues) chargées uniformément et placées librement sur des appuis équidistants.

418. Poutres continues, à travées égales, *chargées uniformément. Moments fléchissants et pressions sur les appuis.* L = *longueur totale de la poutre;* l = *longueur d'une travée.*

NOMBRE de travées.	RÉACTIONS sur les appuis.	MOMENTS FLÉCHISSANTS en fonction de L.	MOMENTS FLÉCHISSANTS en fonction de l
Une seule travée, deux appuis A et B. . . .	En A et B : $\frac{pL}{2}$	Au milieu : $\mu = \frac{pL^2}{8}$	Au milieu : $\mu = \frac{pl^2}{8}$
Deux travées, trois appuis A, B, C. . .	En A et C : $\frac{3}{16}pL$ En B : $\frac{5}{8}pL$	$\mu_1 = \mu_3 = 0$ $\mu_2 = -\frac{pL^2}{32}$	$\mu_1 = \mu_3 = 0$ $-\frac{pl^2}{8}$
Trois travées, quatre appuis A, B, C, D.	En A et D : $\frac{4}{30}pL$ En B et C : $\frac{11}{30}pL$	$\mu_1 = \mu_4 = 0$ $\mu_2 = \mu_3 = -\frac{pL^2}{90}$	$\mu_1 = \mu_4 = 0$ $\mu_2 = \mu_3 = -\frac{pl^2}{10}$
Quatre travées, cinq appuis A, B, C, D, E.	En A et E : $\frac{11}{112}pL$ En B et D : $\frac{2}{7}pL$ En C : $\frac{13}{56}pL$	$\mu_1 = \mu_5 = 0$ $\mu_2 = \mu_4 = -\frac{3}{448}pL^2$ $\mu_3 = -\frac{2}{448}pL^2$	$\mu_1 = \mu_5 = 0$ $\mu_2 = \mu_4 = -\frac{3}{28}pl^2$ $\mu_3 = -\frac{2}{28}pl^2$
Cinq travées, six appuis A, B, C, D, E, F.	En A et F : $\frac{3}{38}pL$ En B et E : $\frac{43}{190}pL$ En C et D : $\frac{37}{190}pL$	$\mu_1 = \mu_6 = 0$ $\mu_2 = \mu_5 = -\frac{2}{950}pL^2$ $\mu_3 = \mu_4 = -\frac{3}{950}pL^2$	$\mu_1 = \mu_6 = 0$ $\mu_2 = \mu_5 = -\frac{2}{19}pl^2$ $\mu_3 = \mu_4 \quad -\frac{3}{34}pl^2$

419. Aiguille verticale supportant une charge de liquide (*fig.* 123). Appelant :

Fig. 123.



a étendue horizontale de liquide dont la pression se reporte contre l'aiguille;
L distance AB des appuis de l'aiguille;
H profondeur de l'eau en amont, à gauche, au-dessus du point B;
H' profondeur de l'eau en aval, à droite;
q et q' pressions horizontales de l'aiguille sur les points A et B;
ω densité du liquide ou le poids du cube de liquide dont le côté a servi à exprimer les longueurs a, L, H, H'.

La pression du liquide sur la face d'amont de l'aiguille est représentée par la surface du triangle rectangle isocèle BCD multipliée par a et par

la densité du liquide; ainsi elle est :

$$\omega \times a \times \frac{H^2}{2}.$$

Sur la face d'aval de l'aiguille, la pression de l'eau est :

$$\omega \times a \times \frac{H'^2}{2}.$$

Les centres de pression sont situés à des hauteurs $\frac{H}{3}$ et $\frac{H'}{3}$ au-dessus au point B (*Int.* 1733).

La somme des pressions de l'aiguille contre ses appuis est la différence des expressions précédentes, c'est-à-dire :

$$\frac{\omega a}{2}(H^2-H'^2).$$

Prenant par rapport au point fixe B les moments des forces qui sollicitent l'aiguille, puisqu'il y a équilibre, on doit avoir :

$$qL = \omega a\left(\frac{H^2}{2}\times\frac{H}{3}-\frac{H'^2}{2}\times\frac{H'}{3}\right), \quad \text{d'où} \quad q=\frac{\omega a}{6L}(H^3-H'^3).$$

On a alors $\quad q'=\frac{\omega a}{2}(H^2-H'^2)-\frac{\omega a}{6L}(H^3-H'^3).$

Pour un point O situé au-dessus du niveau d'aval et à la profondeur z au-dessous du niveau d'amont, on a :

$$\mu=\frac{RI}{n}=q[L-(H-z)]-\frac{\omega a z^3}{6}. \qquad (a)$$

Le point de plus grande courbure de l'aiguille, au-dessus du niveau d'aval, correspond à :

$$z=\sqrt{\frac{2q}{\omega a}}=\sqrt{\frac{H^3-H'^3}{3L}}.$$

Remplaçant z et q par leurs valeurs dans l'équation (a), on a pour le point de plus grande fatigue de la partie considérée, en réduisant,

$$\frac{RI}{n}=\frac{\omega a}{6L}(H^3-H'^3)\left(L-H+\frac{2}{3}\sqrt{\frac{H^3-H'^3}{3L}}\right). \qquad (c)$$

Pour un point O' situé au-dessous du niveau d'aval à la hauteur z' au-dessus du point B, on a, en remarquant que H — H' est la hauteur constante de pression sur tous les points situés au-dessous de ce niveau,

$$\mu=\frac{RI}{n}=q'z'-(H-H')\frac{\omega a z'^2}{2}. \qquad (b)$$

Le point de plus grande fatigue de l'aiguille, au-dessous du niveau

d'aval, correspond à

$$z' = \frac{q'}{\omega a(\mathrm{H} - \mathrm{H}')} = \frac{\mathrm{H} + \mathrm{H}'}{2} - \frac{\mathrm{H}^3 - \mathrm{H}'^3}{6\mathrm{L}(\mathrm{H} - \mathrm{H}')}.$$

Remplaçant z' et q' par leurs valeurs dans l'équation (b), il vient pour le point de plus grande fatigue, en réduisant :

$$\frac{\mathrm{RI}}{n} = \frac{\omega a}{2}(\mathrm{H} - \mathrm{H}')\left(\frac{\mathrm{H} + \mathrm{H}'}{2} - \frac{\mathrm{H}^3 - \mathrm{H}'^3}{6\mathrm{L}(\mathrm{H} - \mathrm{H}')}\right)^2. \qquad (d)$$

Le moment de résistance $\frac{\mathrm{RI}}{n} = \frac{\mathrm{R}bh^2}{6}$ si l'aiguille est un prisme à section rectangulaire (399) ; cette quantité devra être au moins égale à la plus grande des valeurs (c) et (d).

420. **Effort tendant à faire rompre par glissement longitudinal une pièce soumise à un effort de flexion.** (Extrait des *Annales des ponts et chaussées*, 1856 : *Traité des ponts, système How*, par M. Jouravski, ingénieur russe.)

Pour une pièce de section rectangulaire encastrée par une extrémité et sollicitée à l'autre par une force P, lorsqu'il y a équilibre, une section située à la distance l de l'encastrement donne pour somme des moments, par rapport à la ligne neutre, des résistances à l'extension et à la compression de toutes les fibres qui composent la section :

$$\frac{rbh^2}{6} = \mathrm{P}(\mathrm{L} - l). \qquad (1)$$

r effort auquel résistent les fibres les plus éloignées de la ligne des fibres invariables par unité de section ; la valeur limite de r est R.

Les résistances à l'extension des fibres vont en augmentant depuis la nappe neutre, où l'on peut les supposer nulles, jusqu'aux points les plus éloignés de cette ligne, points où les fibres subissent le plus grand allongement. La résultante de toutes ces résistances est égale à leur somme, et elle a pour expression :

$$\frac{rbh}{4}.$$

Les fibres qui résistent à la compression fournissent une résultante égale à la précédente, et comme elle agit en sens contraire de la première, il en résulte que ces deux résultantes tendent à rompre le solide par glissement suivant le plan longitudinal contenant la nappe des fibres invariables. Appelant Q la force qui s'oppose à l'adhésion latérale des fibres situées près des fibres invariables, on a :

$$\mathrm{Q} = \frac{rbh}{4},$$

ou, en remplaçant r par sa valeur tirée de l'équation (1),

$$\mathrm{Q} = \frac{3\mathrm{P}(\mathrm{L} - l)}{2h}. \qquad (2)$$

La valeur de Q est proportionnelle à $L-l$, et elle est maximum quand $l=0$, c'est-à-dire pour la section d'encastrement, qui donne :

$$Q=\frac{3PL}{2h}.$$

Suivant un plan longitudinal situé à la distance y des fibres invariables, la valeur de Q est :

$$Q'=\frac{2br}{h}\left(\frac{h^2}{8}-\frac{y^2}{2}\right). \qquad (a)$$

Q' augmente à mesure que y diminue, et il est maximum pour $y=0$, c'est-à-dire pour le plan longitudinal passant par la ligne des fibres invariables. Faisant $y=0$ dans la valeur de Q', on obtient, comme cela devait être :

$$Q'=Q=\frac{rbh}{4}. \qquad (a')$$

Les équations (1) et (2) deviennent pour la section d'encastrement, en faisant $r=R$, résistance maximum à laquelle on peut soumettre les fibres :

$$P=\frac{Rbh^2}{6L}, \quad (3) \qquad Q=\frac{3PL}{2h}=\frac{Rbh}{4}. \quad (4)$$

La formule (3) servira à vérifier si la pièce résistera convenablement suivant l'encastrement, et la formule (4), si la pièce ne se divisera pas longitudinalement. R_1 étant la résistance de sécurité de la pièce au glissement parallèlement à la longueur des fibres, Q ne devra pas dépasser

$$R_1 \times bL.$$

Supposant que deux solides prismatiques de même longueur L, largeur b et hauteur h, soient mis l'un sur l'autre et encastrés à une extrémité, et que leur ensemble soit chargé à l'autre extrémité d'un poids P, on aura :

$$P=2\,\frac{Rbh^2}{6L}.$$

Mais si les deux solides sont unis de manière à ne former qu'une seule pièce, on a :

$$P'=\frac{Rb(2h)^2}{6L}=2P.$$

Ce qui montre qu'en empêchant les deux pièces de glisser l'une sur l'autre on double la charge qu'elles peuvent porter.

Dans la pratique, on s'oppose au glissement au moyen de clefs. Les formules (a) et (a') serviront à déterminer le nombre et les dimensions de ces clefs, selon la position du joint par rapport au milieu de la hauteur de la pièce. Ces formules montrent de plus que Q' est proportionnel à r; or, comme r est proportionnel, pour un même poids P, à $L-l$ (*formule* 1), on voit que les clefs devront être également espacées entre elles sur toute la longueur de la pièce. Il est évident qu'on devra calculer le nombre des clefs pour la plus grande valeur de Q', c'est-à-dire

pour la section d'encastrement, ou en faisant $r = R$ dans les équations (a) et (a'). Les clefs doivent avoir une largeur telle, qu'elles ne soient pas cisaillées transversalement par les deux parties de la poutre, et leur hauteur doit donner des entailles capables de résister ensemble à la compression Q sans altération.

Les clefs, sous l'action des deux parties de la poutre, tendent à tourner autour de leurs axes; il en résulte qu'elles ne pressent pas uniformément contre les entailles, et que pour cette raison on doit augmenter un peu la profondeur de ces entailles. De plus, cette tendance des clefs à tourner écarterait les pièces qui forment la poutre, si on ne les reliait pas entre elles par des brides en fer.

Si la poutre reposait sur deux appuis placés à ses extrémités, et qu'elle fût chargée du poids P en son milieu, on la considérerait comme étant encastrée au milieu de sa longueur, et chargée à chaque extrémité du poids $\frac{P}{2}$.

Si dans ce dernier cas le poids P était réparti uniformément sur toute la longueur de la poutre, p étant la charge par mètre de longueur, on aurait $P = pL$, et pour l'équilibre d'une longueur $\frac{L}{2} - l$, comptée à partir d'une extrémité, la formule (1) deviendrait :

$$\frac{rbh^2}{6} = \frac{pL}{2}\left(\frac{L}{2} - l\right) - \frac{p}{2}\left(\frac{L}{2} - l\right)^2.$$

La force Q, qui tend à opérer la disjonction de la poutre suivant l'étendue $\frac{L}{2} - l$, est $\frac{rbh}{4}$, et l'on a, en remplaçant r par sa valeur tirée de l'équation précédente:

$$Q = \frac{3p}{4h}\left(\frac{L^2}{4} - l^2\right).$$

La valeur de Q augmentant à mesure que le carré de l est plus petit, on voit que les clefs devront être plus rapprochées ou plus profondes vers les extrémités de la poutre qu'au milieu. De même pour une poutre encastrée à une extrémité, et chargée uniformément sur toute sa longueur, les clefs doivent être de plus en plus rapprochées ou plus profondes à partir de l'encastrement.

Les considérations précédentes s'appliquent aux rivets des poutres en tôle comme aux clefs des poutres en bois.

Autre expression de l'effort de glissement. D'après Bresse et Bélanger, on a :

$$g = \frac{T}{bI} \sum \omega v.$$

g = effort de glissement; b largeur de la pièce considérée; T effort tranchant moyen; I moment d'inertie du profil par rapport au centre de gravité.

Cet effort g est nul sur les faces extrêmes et maximum pour la section des fibres neutres où il atteint les $\frac{3}{2}$ de l'effort tranchant moyen.

421. Recherche des coefficients de dépense correspondant aux formes géométriques des solides soumis à la flexion, faite par L.-A. BARRÉ (1). On sait par l'expérience la plus élémentaire que la charge de flexion d'un solide, reposant librement sur deux appuis, dépend essentiellement de la distribution des éléments de sa section transversale, c'est-à-dire de la forme géométrique de cette section transversale. On sait aussi que les profils évidés sont plus économiques que les profils pleins, et que dans les solives la hauteur et la portée sont les éléments prépondérants par rapport à la charge que ces solives peuvent porter. Les formules de la résistance ne permettent pas d'apprécier immédiatement l'économie pécuniaire que donne une section rectangulaire, par exemple, sur une section triangulaire ou curviligne ou l'économie d'un profil évidé sur une section pleine. J'ai cherché à rendre manifeste l'influence de la forme géométrique des profils au moyen de coefficients numériques attribués à ces profils. En rapprochant les formules de la flexion des solides, on parvient facilement à leur donner un caractère de généralité en y introduisant une notion très élémentaire : *la charge moyenne de flexion par unité de section transversale du solide.* Dans chaque cas particulier, cette *charge fictive* s'obtiendra en divisant la charge totale fléchissante par la section transversale de la solive.

Ainsi qu'on le verra ci-après, ce quotient peut être considéré comme le coefficient de dépense d'un profil pour une hauteur de solive et de portée données.

Ce quotient ou cet *effort moyen* multiplié par la section transversale du solide reproduira nécessairement la charge totale fléchissante que nous supposerons uniforme pour plus de simplicité.

On trouve par cette considération de la charge moyenne de flexion (*qui ne se rapporte à aucune notion de mécanique*) un résultat général que l'on peut énoncer ainsi :

La charge moyenne de flexion d'un solide plein ou creux par unité superficielle de sa section transversale est proportionnelle au rapport de l'une des dimensions verticales du solide à sa longueur ou portée dans œuvre. Cette charge est indépendante des dimensions tranversales du profil.

Il y a dans ce résultat général une sorte de connexion avec l'*effort moyen* de compression par unité superficielle de la section transversale d'un solide chargé debout; effort moyen qui dépend, comme on le sait, du rapport de la longueur du solide au plus petit côté de sa section transversale. Je vais établir la loi énoncée se rapportant à la charge moyenne de flexion d'une solive ou d'un solide reposant sur deux appuis et chargé uniformément sur toute sa longueur pour les sections les plus usuelles (*fig.* 123 *bis*).

1° *Solive à section rectangulaire reposant sur deux appuis et recevant une charge* pl *répartie uniformément sur toute sa longueur* (Profil A).

Pour ce cas, on a les formules bien connues (l étant la longueur de la

(1) Cette étude a été publiée, en partie pour la première fois, en 1885, dans la *Semaine des Constructeurs* (pages 124 et 140, volume X°).

Charges moyennes de flexion des solives
par unité superficielle de leurs sections transversales.

Fig. 123 *bis.*

	CHARGES moyennes F.	VALEURS de $\frac{I}{n}$.
A	$\frac{4}{3} R \left(\frac{h}{l}\right)$	$\frac{bh^2}{6} = \frac{\omega h}{6}$
B	$\frac{2}{3} R \left(\frac{h}{l}\right)$	$\frac{bh^2}{24} = \frac{\omega h}{12}$
C	$\frac{1}{3} R \left(\frac{h}{l}\right)$	$\frac{bh^2}{24} = \frac{\omega h}{24}$
D	$R \left(\frac{h}{l}\right)$	$\frac{\omega h}{8}$
E	$0,96\, R \left(\frac{h}{l}\right)$	$0,12\, \omega h$
F	$2\, R \left(\frac{h}{l}\right)$	$\frac{\omega}{4} h$
G	$2,3\, R \left(\frac{H}{l}\right)$ à $3\, R \left(\frac{H}{l}\right)$	$0,284\, \omega H$ à $0,363\, \omega H$
H — Poutre à treillis	$4\, R \left(\frac{h}{l}\right)$	$\frac{1}{2} \omega h$

solive, b et h ses dimensions transversales) :

$$\frac{pl^2}{8} = R\,\frac{I}{n}, \qquad (1)$$

$$\frac{I}{n} = \frac{bh^2}{6} = \frac{\omega h}{6}, \qquad (2)$$

$$\omega = bh = \textit{section de la solive}. \qquad (3)$$

La charge moyenne de flexion a pour expression :

$$F = \frac{pl}{\omega}. \qquad (4)$$

Remplaçant pl par sa valeur déduite de (1), ω par sa valeur (3) et $\frac{I}{n}$ par sa valeur (2), il vient pour l'expression de la charge moyenne de flexion (4) :

$$F = \frac{4}{3}\,R\left(\frac{h}{l}\right).$$

Ainsi pour une solive rectangulaire la charge moyenne de flexion est proportionnelle au rapport de la hauteur h de la solive à sa longueur l.

La charge totale pl s'obtiendra en multiplant la charge moyenne par la section transversale rectangulaire ω.

2° *Solive à section triangulaire, chargée uniformément* (Profil B). On a les formules :

$$\frac{pl^2}{8} = R\,\frac{I}{n}, \qquad (1)$$

$$\frac{I}{n} = \frac{bh^2}{24} = \frac{\omega h}{12},$$

$$\omega = \frac{bh}{2} = \text{section transversale};$$

d'où l'on déduit pour la charge moyenne de flexion :

$$F = \frac{pl}{\omega} = \frac{2}{3}\,R\left(\frac{h}{l}\right).$$

Ce résultat est moitié de celui trouvé pour une section rectangulaire.

3° *Solive chargée uniformément dont la section est un losange ou un parallélogramme* (Profil C), (*l'une des diagonales étant horizontale*). On a les formules :

$$\omega = bh,$$

$$\frac{I}{n} = \frac{1}{24}\,bh^2 = \frac{1}{24}\,\omega h,$$

$$\frac{pl^2}{8} = R\,\frac{I}{n}.$$

On en déduit pour la charge moyenne de flexion :

$$F = \frac{pl}{\omega} = \frac{1}{3}\,R\left(\frac{h}{l}\right).$$

Ce résultat est moitié de celui trouvé pour un triangle et le quart de celui trouvé pour un rectangle.

4° *Solive chargée uniformément, à profil circulaire ou elliptique* (Profil D).

Pour la section circulaire, de rayon r, on a :

$$\omega = \pi r^2,$$

$$\frac{I}{n} = \frac{\pi r^3}{4} = \omega \frac{r}{4} = \omega \frac{h}{8}.$$

Par suite, de la relation :

$$\frac{pl^2}{8} = R \frac{I}{n} = R \omega \frac{h}{8},$$

on déduit pour la charge moyenne de flexion :

$$F = \frac{pl}{\omega} = R \left(\frac{h}{l}\right).$$

Ainsi comme pour les sections rectangulaires et triangulaires, la charge moyenne de flexion d'une solive cylindrique pleine est proportionnelle au rapport de la hauteur verticale de la solive $h = 2r$, son diamètre à la portée de celle-ci.

Section elliptique. La section elliptique donne le même résultat, ainsi qu'il est facile de le vérifier. On a en effet pour une ellipse dont le petit axe est $2b = h$ et le grand axe $2a$ (*Profil* D) perpendiculaire à la direction de la charge fléchissante :

$$\frac{I}{n} = \frac{\pi a b^2}{4} = \frac{\omega b}{4}.$$

La relation :

$$\frac{pl^2}{8} = R \frac{I}{n}$$

donne pour la charge moyenne de flexion, en remarquant que $\omega = \pi a b$:

$$F = \frac{pl}{\omega} = R \left(\frac{2b}{l}\right) = R \left(\frac{h}{l}\right).$$

Même résultat si le grand axe est vertical. Alors $h = 2a$.

5° *Solive chargée uniformément dont la section transversale est un demi-cercle ou une demi-ellipse* (Profil E).

On a pour la section demi-circulaire :

$$\omega = \frac{\pi r^2}{2}.$$

et

$$\frac{I}{n} = 0{,}190\, r^3 = 0{,}120\, \omega r.$$

De l'expression :

$$\frac{pl^2}{8} = R \frac{I}{n}$$

on déduit pour la charge moyenne de flexion :

$$F = \frac{pl}{\omega} = 0{,}96\,R\left(\frac{h}{l}\right).$$

Cet effort est un peu moindre que pour la section circulaire pleine; il en est les $\frac{96}{100} = \frac{24}{25}$.

Pour les profils demi-elliptiques (*Profils* E) on trouve le même résultat que pour le demi-cercle. La charge moyenne de flexion est donc donnée par la même expression pour tous les solides dont la section transversale est l'une des formes (*Profils* E), h étant la hauteur commune de ces profils.

Il en résulte que les résistances totales à la flexion des trois solives D de même portée et de même hauteur sont proportionnelles à leurs sections ou à leurs bases.

6° *Solives dont la section est une couronne circulaire ou elliptique* (Profils F). On a pour la couronne circulaire (r et r' étant les deux rayons) :

$$\omega = \pi(r^2 - r'^2), \qquad (1)$$

$$\frac{I}{n} = \frac{\pi(r^4 - r'^4)}{4r} = \frac{\pi(r^2 - r'^2)(r^2 + r'^2)}{4r}$$

ou

$$\frac{I}{n} = \frac{\omega}{4}\left(r + \frac{r'^2}{r}\right). \qquad (2)$$

Pratiquement, l'épaisseur de la couronne n'est pas arbitraire, et l'on peut, pour fixer les idées, adopter une épaisseur minimum $e = 0{,}01\,r'$ et une épaisseur maximum $e = 0{,}1\,r'$.

La limite inférieure donne :

$$e = r - r' = 0{,}01\,r',$$

d'où :

$$r = 1{,}01\,r'$$

et

$$r + \frac{r'^2}{r} = 1{,}01\,r' + \frac{r'^2}{1{,}01\,r'_1} = 1{,}99009\,r'.$$

On peut donc écrire très approximativement :

$$r + \frac{r'^2}{r} = 2r',$$

par suite, la relation (2) devient :

$$\frac{I}{n} = \frac{\omega}{4}\,2\,r' = \frac{\omega}{4}\,h$$

et de la formule générale

$$\frac{pl^2}{8} = R\,\frac{I}{n}$$

on déduit pour la charge moyenne de flexion

$$F = \frac{pl}{\omega} = 2\,R\left(\frac{h}{l}\right).$$

La limite supérieure d'épaisseur donne :

$$e = r - r' = 0{,}1\,r',$$

d'où :

$$r = 1{,}1\,r'$$

et

$$r + \frac{r'^2}{r} = 1{,}1\,r' + \frac{r'^2}{1{,}1\,r'} = 2{,}009\,r',$$

ou approximativement

$$r + \frac{r'^2}{r} = 2\,r'$$

avec une erreur relative par défaut de $\frac{1}{223}$.

On aura donc comme ci-dessus :

$$\frac{I}{n} = \frac{\omega}{4}\,h.$$

On obtiendra, comme précédemment, pour la charge moyenne de flexion :

$$F = 2\,R\left(\frac{h}{l}\right).$$

On peut vérifier que pour une épaisseur $e = \frac{r'}{8}$, la charge moyenne de flexion a pour valeur :

$$F = 2{,}013\,R\left(\frac{h}{l}\right),$$

ou approximativement

$$F = 2\,R\left(\frac{h}{l}\right)$$

avec une errenr par défaut de $\frac{1}{155}$.

Couronne elliptique (Profils F). Si le profil est formé avec deux ellipses concentriques semblables ou non, les mêmes calculs et les mêmes limites d'épaisseur aux sommets peuvent être appliquées et donnent comme précédemment, pour la charge moyenne de flexion, la valeur très approximative :

$$F = 2R\left(\frac{h}{l}\right).$$

7° *Solive chargée uniformément dont la section évidée est celle d'un fer à double* T *ou d'un caisson à deux lames verticales* (Profil G). Afin d'arriver rapidement à une approximation suffisante pour la recherche

de la charge moyenne de flexion, nous exprimerons toutes les dimensions du profil en fonction de l'une d'elles, en attribuant successivement aux nervures des épaisseurs minima et maxima se rapportant aux proportions pratiques.

Ainsi, en prenant les données suivantes qui conviennent pour les fers laminés à planchers, petites ailes et faibles nervures, savoir :

$$e = \frac{1}{15}\,\mathrm{H} = \text{épaisseur des tables};$$

$$a = \frac{1}{20}\,\mathrm{H} = \text{épaisseur de l'âme};$$

$$b = \frac{\mathrm{H}}{3} = \text{largeur du } \mathbf{T},$$

on trouve :

$$\omega = 0{,}088\,\mathrm{H}^2$$

et

$$\frac{\mathrm{I}}{n} = 0{,}025\,\mathrm{H}^3 = 0{,}284\,\mathrm{H}\,\omega.$$

Par suite, la formule de la charge uniforme :

$$\frac{pl^2}{8} = \mathrm{R}\left(\frac{\mathrm{I}}{n}\right)$$

donne pour la charge moyenne de flexion par unité superficielle du profil :

$$\mathrm{F} = \frac{pl}{\omega} = \frac{8\,\mathrm{R}}{l}\,\frac{\mathrm{I}}{n} = \frac{\mathrm{H}}{l} = 2{,}37\,\mathrm{R}\left(\frac{\mathrm{H}}{l}\right).$$

Pour de grandes proportions de nervures prenons :

$$b = \frac{2}{3}\,\mathrm{H}, \quad e = \frac{\mathrm{H}}{10}, \quad a = \frac{\mathrm{H}}{15}.$$

Le calcul donne :

$$\frac{\mathrm{I}}{n} = 0{,}060 = 0{,}363\,\omega\,\mathrm{H}$$

et pour la charge moyenne par unité superficielle du profil :

$$\mathrm{F} = \frac{pl}{\omega} = 2{,}9\,\mathrm{R}\left(\frac{\mathrm{H}}{l}\right).$$

Nous admettons que les coefficients de la charge moyenne de flexion pour les profils à double **T** symétrique varient entre les deux valeurs suivantes 2,3 et 3, en nombres ronds. Ces limites n'ont rien d'absolu, parce que cette charge moyenne augmente à mesure que les tables ont plus d'importance par rapport à l'âme ou tôle verticale. Lorsque la solive se réduit à ses deux tables, comme dans les poutres à treillis, on a pour la charge moyenne de flexion (H étant la hauteur de la poutre et h la distance des tables) :

$$\mathrm{F} = \frac{pl}{\omega} = 4\,\mathrm{R}\left(\frac{h}{l}\right) = 3{,}96\,\mathrm{R}\left(\frac{\mathrm{H}}{l}\right) \text{ environ},$$

résultat calculé ci-après et correspondant au profil H.

8° *Solive ou poutre dont la section se réduit à deux tables. — Poutre à treillis* (Profil H.) D'après la figure, on a :

$$\frac{I}{n} = \frac{b(H^3 - h^3)}{6h}.$$

L'épaisseur e des tables n'est pas arbitraire et l'on peut admettre un minimum $e = 0{,}01\,h$ et un maximum $e = 0{,}1\,h$. La première limite $e = 0{,}01\,h$ donne en exprimant les dimensions de la figure en fonction de h :

$$H = 1{,}02\,h,$$
$$\omega = 0{,}02\,bh,$$
$$\frac{I}{n} = 0{,}0100\,bh^2 = \frac{1}{2}\,\omega\,h.$$

De la formule :

$$\frac{pl^2}{8} = R\left(\frac{I}{n}\right)$$

on déduit pour la charge moyenne de flexion :

$$F = \frac{pl}{\omega} = 4\,R\left(\frac{h}{l}\right) = 4 \times 0{,}98\,\frac{H}{l}$$

ou

$$F = 3{,}92\,R\left(\frac{H}{l}\right) = 3{,}998\left(\frac{h}{l}\right).$$

Calcul pour la limite supérieure d'épaisseur des tables.

Soient :

$$e = 0{,}1\,h,$$
$$H = 1{,}2\,h,$$
$$\omega = 0{,}2\,bh,$$
$$\frac{I}{n} = 0{,}10111\,bh^2.$$

On déduit la charge moyenne de flexion de la relation :

$$\frac{pl^2}{8} = R\,\frac{I}{n}$$

d'où :

$$F = \frac{pl}{\omega} = 4{,}04\,R\left(\frac{h}{l}\right) = 3{,}96\,R\left(\frac{H}{l}\right).$$

Approximativement on peut poser pour tous les cas $F = 4\,R\left(\frac{h}{l}\right)$ en nombre rond avec une très petite erreur relative soit en plus soit en moins. Telle est la valeur approximative de la charge moyenne de flexion par unité superficielle des deux tables d'une poutre à treillis.

Le résultat est triple de celui donné par un rectangle plein. Mais ici l'économie n'est pas absolue; car on n'a pas tenu compte des treillis qui conduisent à une grande dépense.

Résumé. Nous rapprochons ici les résultats numériques qui expriment

respectivement les charges moyennes de flexion des solives par mètre carré de leurs sections transversales.

Profils.	Charge moyenne de flexion F.
1° Rectangulaire plein.	$\frac{4}{3}$ R $\left(\frac{h}{l}\right)$
2° Triangulaire	$\frac{2}{3}$ R $\left(\frac{h}{l}\right)$
3° En losange	$\frac{1}{3}$ R $\left(\frac{h}{l}\right)$
4° Circulaire ou elliptique plein	R $\left(\frac{h}{l}\right)$
5° Demi-circulaire ou demi-elliptique.	0,96 R $\left(\frac{h}{l}\right)$
6° Couronne circulaire et elliptique creuses.	2 R $\left(\frac{h}{l}\right)$
7° Profil à double T symétrique avec âme.	2,3à3R $\left(\frac{H}{l}\right)$
8° Profil composé de deux tables sans âme.	4 R $\left(\frac{h}{l}\right)$

Ces divers résultats montrent que pour les solides pleins soit rectilignes, soit curvilignes, la charge moyenne de flexion est proportionnelle au rapport de la hauteur verticale h du solide à sa longueur l ou portée.

La même loi est applicable aux solides creux.

Dans tous les cas, la charge totale et uniforme que peut porter chaque solive s'obtient en multipliant la charge moyenne de flexion par la section transversale de la solive. Les coefficients numériques des sections peuvent être considérés comme mesurant la dépense d'un profil par rapport aux autres.

Du tableau précédent, on déduit que, pour des solives pleines de même portée l, de même hauteur h, si l'on prend la charge moyenne de flexion de la solive rectangulaire pour unité : 1° la charge moyenne de flexion de la solive triangulaire est moitié de celle de la solive rectangulaire et celle de la solive à profil en losange en est le quart; 2° la poutre à treillis réduite à deux tables et dont la hauteur est égale à celle rectangulaire pleine, donne une charge moyenne par unité superficielle triple de celle de la poutre rectangulaire pleine (*abstraction faite du treillis*).

Pour les solives pleines, à section circulaire ou elliptique, de même hauteur h et de même portée l, la charge moyenne est la même et les charges totales sont proportionnelles aux sections ou à la largeur des profils. Les demi-profils circulaires et elliptiques donnent la même conséquence.

Pour les profils demi-circulaires et demi-elliptiques, la charge moyenne de flexion est un peu plus faible que pour les profils entiers circulaires et elliptiques.

Enfin, en comparant les profils curvilignes pleins aux profils curvi-

lignes creux, on constate que pour le même rapport $\left(\frac{h}{l}\right)$ la charge moyenne de flexion est double pour les solides creux. Pour le type rectangulaire, le tableau montre l'économie des profils évidés. Enfin, pour les poutres à treillis, la charge moyenne de flexion des tables est à peu près le triple de celle du rectangle plein, h étant l'écartement des tables.

On reconnaît aussi que deux solives de même type présentant le même rapport $\left(\frac{h}{l}\right)$ de leurs hauteurs à leurs portées, les charges totales de ces solives sont proportionnelles à leurs sections, le coefficient de sécurité R étant le même. Les dépenses par mètre linéaire de solives sont en même temps proportionnelles à ces mêmes sections.

Nous terminerons par une remarque concernant la comparaison des formules ci-dessus et celles se rapportant à la compression des solides. Pour les poteaux en bois les expériences de Rondelet, et pour les colonnes en fer et en fonte les formules d'Hodgkinson, de Love, de Rankine, etc., établissent que la charge moyenne de compression est constante pour une même valeur du rapport $\left(\frac{h}{c}\right)$ de la hauteur du support à l'une des dimensions de sa section transversale : le plus petit côté s'il s'agit d'une section rectangulaire et du diamètre pour une section circulaire. Pour la flexion, on vient d'établir que la charge moyenne de flexion est à très peu près constante pour un même type de solives présentant le même rapport $\left(\frac{h}{l}\right)$ de la hauteur verticale de la solive à sa longueur. Mais il y a cette différence caractéristique, c'est que pour la compression la charge moyenne est une fonction parabolique du second degré du rapport $\left(\frac{h}{c}\right)$, tandis que pour la flexion des solives la charge moyenne de flexion est une fonction linéaire du rapport $\left(\frac{h}{l}\right)$ et lui est proportionnelle.

Nota. En prenant $R = 10$ kilog. par millimètre carré, les valeurs du tableau précédent expriment les charges moyennes de flexion par millimètre carré des sections transversales des solives.

422. Résistance à la torsion. Lorsqu'une pièce cylindrique ou prismatique homogène est soumise à un effort de torsion, tant qu'on n'a pas dépassé la limite d'élasticité, on a :

$$f = G\theta\delta, \quad P\rho = G\theta I_0, \quad \operatorname{tang} \alpha = \theta\delta. \qquad (a)$$

f effort tangentiel (rapporté à l'unité de surface), qui sollicite un élément d'une section quelconque à la distance δ de l'axe ;

F valeur maxima de f pour les éléments d'une section transversale du solide, les plus éloignés de son axe et pour lesquels $\delta = n$. C'est le plus grand effort de glissement supporté par les éléments les plus fatigués d'une section transversale (par mètre carré). F est un coefficient de sécurité que l'on prend égal à une fraction de l'effort de rupture par torsion ;

G coefficient de torsion supporté à la section transversale du solide. C'est le

rapport constant pour une matière donnée jusqu'à la limite d'élasticité de la force F qui tend à tordre le solide au déplacement θn. On a :

$$G = \frac{F}{\theta n} = \frac{f}{\theta \delta};$$

θ angle de torsion ou angle dont deux sections, à 1 mètre de distance suivant l'axe, se déplacent l'une par rapport à l'autre; θ est exprimé par la longueur de l'arc qui correspond à θ pour un point situé à l'unité de distance de l'axe, soit par le nombre de degrés de θ multiplié par le rapport $\frac{\pi}{180}$; donc $\theta = \frac{\pi\theta}{180}$ dans les formules précédentes;

α angle de l'hélice en laquelle se transforme une fibre primitivement rectiligne, située à la distance δ de l'axe; θ étant exprimé en degrés, on a $\text{tang}\,\alpha = \frac{\pi\theta\delta}{180}$;

δ distance variable des fibres considérées à l'axe du solide;

P force tendant à tordre le corps, agissant dans un plan normal à l'axe;

ρ bras de levier de P;

$I_0 = \int \delta^2 d\omega$ somme des produits des éléments superficiels $d\omega$ de la section de la pièce par le carré de leur distance δ à l'axe longitudinal du solide soumis à la torsion. I_0 est appelé *moment d'inertie polaire.*

Pour une section circulaire . . . . $I_0 = \frac{\pi d^4}{32} = \omega \frac{d^2}{8}$.

Pour une section en couronne circulaire . $I_0 = \frac{\pi(d^4 - d'^4)}{32} = \frac{\omega}{8}(d^2 + d'^2)$.

Pour une section rectangulaire. . . . . . . $I_0 = \frac{b^3h^3}{3(b^2+h^2)} = \frac{\omega b^2h^2}{3(b^2+h^2)} = \frac{bh}{12}(b^2+h^2)$.

Pour une section carrée, $c = b = h$ . . . . $I_0 = \frac{c^4}{6} = \frac{\omega c^2}{6}$.

Pour un triangle équilatéral. . . . . $I_0 = \frac{1}{48}c^4\sqrt{3} = \frac{1}{12}\omega c^2$.

Pour un hexagone régulier . . . . $I_0 = \frac{5}{8}c^4\sqrt{3} = \frac{5}{12}\omega c^2$.

Pour un octogone régulier. . . . . $I_0 = \frac{1}{6}c^4(11 + 8\sqrt{2}) = \frac{1}{12}\omega c^2(5 + 3\sqrt{2})$.

Pour une section cruciforme, p. 460, profil symétrique n° 4. . 7. . . . . . . $I_0 = \frac{2h^3e^3}{3(e^2+h^2)} - \frac{e^4}{6}$.

d diamètre du cylindre plein;

d' et *d''* diamètre extérieur et intérieur du cylindre creux;

b et *h* côtés de la section rectangulaire de la pièce;

c côté de la pièce à section carrée.

Des formules (*a*), on conclut les deux suivantes, qui répondent à la solution des deux problèmes généraux relatifs à la torsion; la première donne le moment de torsion et la seconde le déploiement des sections :

$$P\rho = \frac{I_0 F}{n} \quad \text{et} \quad \text{tang}\,\alpha = \frac{P\rho n}{G I_0},$$

d'où l'on déduit pour l'effort de torsion :

$$P = \frac{I_0 F \rho}{n}.$$

Voici les valeurs de G et de F pour diverses matières. L'effort tangentiel F' indiqué au tableau est le tiers de celui qui correspond aux déformations permanentes appréciables. Ces valeurs sont rapportées au mètre carré. Pour un millimètre carré, il faut diviser les valeurs de G et de F' par 1 000 000; ce qui donne pour le fer forgé : F = 6 kilog. par millimètre carré. F est la valeur pratique du coefficient de sécurité.

MATIÈRES.	VALEURS PRATIQUES DE F.	VALEUR DE G.	VALEUR DE F'.
Fer forgé	6k, par mill.².	6 000 000 000 à 7×10^9	6×10^6
Fer laminé.	4 à 6	6×10^9	6×10^6
Acier corroyé . . .	6	8×10^9	8×10^6
Acier fondu	10	10×10^9	10×10^6
Fonte	1,5 à 2	2×10^9	2×10^6
Cuivre rouge. . . .	» »	$4{,}366\times10^9$	$4{,}366\times10^6$
Bronze.	» »	$1{,}066\times10^9$	$1{,}066\times10^6$
Bois de chêne. . .	0k,266	$0{,}4\times10^9$	$0{,}4\times10^6$
Bois de sapin . . .	0 ,288	$0{,}438\times10^9$	$0{,}438\times10^6$

Dans les formules précédentes (page 513) n a les valeurs suivantes :

Pour le cercle. $n = r$;

Pour le carré et le rectangle . . . . $n = \frac{d}{2}$ d étant la diagonale ;

Pour la couronne circulaire, le triangle équilatéral, l'hexagone et l'octogone . . . . $n = \frac{d}{2}$ d = diamètre du cercle circonscrit.

Quel doit être le diamètre à donner à un arbre reposant sur deux coussinets entre lesquels il n'est soumis à aucun effort de flexion, cet arbre étant commandé à une extrémité par une roue d'engrenage ou une poulie placée en porte-à-faux, c'est-à-dire en dehors des coussinets, et commandant à son autre extrémité une roue d'engrenage ou une poulie également placée en porte-à-faux ? Pour la partie intermédiaire aux coussinets, on a :

$$F = \frac{P\rho n}{I_0},$$

formule de laquelle on déduit, en remarquant que pour une section circulaire on a :

$$n = \frac{d}{2} \quad \text{et} \quad I_0 = \frac{\pi d^4}{32},$$

$$d^3 = \frac{16\,P\rho}{\pi F}, \quad \text{d'où} \quad d = 1{,}72\sqrt[3]{\frac{P\rho}{F}}. \qquad (1)$$

$P\rho = 2\pi$ étant le travail transmis à l'arbre pour un tour, on a :

$$P\rho \times 2\pi = 75\,C\,\frac{60}{n}, \quad \text{d'où} \quad P\rho = 716{,}3\,\frac{C}{n}.$$

C travail en chevaux transmis à l'arbre;
n nombre de tours que fait l'arbre par minute.

Substituant cette valeur de $P\rho$ dans l'équation (1), on a pour l'expression du diamètre en fonction du nombre de chevaux transmis à l'arbre :

$$d = 15,4 \sqrt[3]{\frac{C}{nF}}. \qquad (2)$$

Désignant par A le nombre de kilogrammètres transmis à l'arbre par minute, on a :

$$P\rho = \frac{75\,C \times 60}{2\pi n} = \frac{A}{2\pi n},$$

et cette valeur substituée dans l'équation (1) donne :

$$d^3 = 5,095 \frac{A}{2\pi nF} = \frac{0,811}{F} \times \frac{A}{n} = K \frac{A}{n}. \qquad (3)$$

Les formules (1), (2) et (3) supposent que l'arbre est animé d'un mouvement de rotation uniforme, que son accélération angulaire est nulle, et, par suite, que l'effort de torsion est constant dans toutes les sections. La plupart des auteurs adoptent la même formule (3) pour les arbres animés d'un mouvement de rotation varié; mais en faisant varier le coefficient K, non seulement avec la nature de la matière employée dans la construction de l'arbre, mais aussi avec la nature du travail qu'il doit transmettre. M. V. Contamin résume, dans le tableau suivant, les valeurs de K dont il est alors fait usage (page 426) :

CONDITIONS DE LA TRANSMISSION du travail.	ARBRES RONDS en fer.		ARBRES RONDS en fonte.	
	F	K	F	K
Travail régulier avec moteur régulier (roue ou turbine)	4×10^6	$\frac{0,20}{10^6}$	2×10^6	$\frac{0,405}{10^6}$
Travail régulier avec moteur moins régulier	$3,5 \times 10^6$	$\frac{0,22}{10^6}$	$1,75 \times 10^6$	$\frac{0,443}{10^6}$
Travail irrégulier avec moteur régulier	3×10^6	$\frac{0,27}{10^6}$	$1,50 \times 10^6$	$\frac{0,540}{10^6}$
Travail irrégulier avec moteur irrégulier	$2,5 \times 10^6$	$\frac{0,325}{10^6}$	$1,25 \times 10^6$	$\frac{0,650}{10^6}$
Travail par intermittence	2×10^6	$\frac{0,405}{10^6}$	$1,00 \times 10^6$	$\frac{0,811}{10^6}$
Laminoirs	$1,5 \times 10^6$	$\frac{0,540}{10^6}$	»	»
Marteaux	$0,75 \times 10^6$	$\frac{1,08}{10^6}$	$0,50 \times 10^6$	$\frac{1,62}{10^6}$

On substitue souvent des arbres creux en fonte aux arbres pleins. Cette disposition présente de grands avantages comme économie de poids. Pour l'arbre plein, la formule (1) donne :

$$P\rho = F \frac{I_0}{n} = F \frac{\pi d^3}{16}.$$

Pour l'arbre creux on a, en remplaçant I_0 par sa valeur précédente donnée pour la section en couronne circulaire et en faisant :

$$n = \frac{d}{2},$$

$$P\rho = F\,\frac{\pi}{16} \times \frac{d^4 - d'^4}{d'}.$$

Il est facile de s'assurer que le cylindre creux est plus économique que le cylindre plein.

Pour un cylindre plein de diamètre D et de section Ω, le moment d'inertie polaire a pour valeur (*voir le tableau ci-dessus*, page 513):

$$I_0 = \frac{\Omega}{8} D^2 ,$$

d'où :

$$\frac{I_0}{n} = \frac{\Omega}{4} D,$$

par suite, la formule générale du moment de torsion donne :

$$P\rho = \frac{I_0}{n} F = \frac{\Omega}{4} D.F. \qquad (A)$$

Pour un cylindre creux, on a :

$$I_0 = \frac{\omega}{8}\left(d^2 + d'^2\right),$$

$$\frac{I_0}{n} = \frac{\omega}{4}\left(d + \frac{d'^2}{d}\right).$$

Pour fixer les idées, prenons l'épaisseur de la couronne $e = \frac{d}{5}$, d'où

$$d' = \frac{3d}{5},$$

par suite :

$$\frac{I_0}{n} = \frac{\omega}{4}\,\frac{34}{25}\,d$$

et

$$P\rho = \frac{\omega}{4}\cdot\frac{34}{25}\,d\,F. \qquad (B)$$

Si, dans les formules (A) et (B), on fait $\Omega = \omega$, il en résulte pour le rapport des moments de torsion la valeur : $\frac{10}{17}$. Ainsi, l'effort de torsion pour le cylindre plein est dans cet exemple les $\frac{10}{17}$ de celui du cylindre creux, pour des sections équivalentes et même condition de sécurité.

Les sections carrées ne sont guère employées que pour les arbres en bois. A résistance égale, ils sont plus lourds que les arbres cylindriques; la matière y est moins bien utilisée, puisque les quatre arêtes sont seules soumises à l'effort tangentiel maximum de glissement F.

Pour l'arbre à section carrée, on a : $I_0 = \frac{c^4}{6}$ et $n = \frac{c}{\sqrt{2}}$; donc la formule générale du moment de torsion donne :

$$P\rho = F\frac{I_0}{\delta} = F\frac{c^4}{6} \times \frac{\sqrt{2}}{c} = F\frac{c^3}{\sqrt{18}} = F\frac{c^3}{4,243}. \qquad (1)$$

Pour un arbre cylindrique plein, on a, en tenant compte du moment d'inertie polaire :

$$P\rho = \frac{F\omega r}{2}. \qquad (2)$$

En prenant le rapport de (1) à (2), on trouve que l'effort F de torsion de l'arbre carré est les 0,82 de celui de l'arbre cylindrique plein.

Si un *arbre* est *animé d'un mouvement de rotation varié*, c'est qu'il est sollicité par un moment de torsion $P\rho$ plus grand à l'une de ses extrémités qu'à l'autre. Dans ce cas, la section devra être déterminée pour résister à la plus grande valeur de $P\rho$.

Souvent des considérations spéciales imposent la condition que le déplacement relatif au pourtour des sections extrêmes de la partie de l'arbre soumise à la torsion ne dépasse pas une limite donnée t. Lorsqu'on calcule les dimensions en vue de remplir cette condition, elles résultent de la formule suivante (1'), déduite de l'équation (1).

Pour un arbre cylindrique de rayon r, la formule (a) (p. 512) donne :

$$F = G\theta r.$$

Or $\theta r = \frac{t}{l}$; donc $F = G\frac{t}{l}$, et, par suite :

$$d = 1,72\sqrt[3]{\frac{P\rho}{G\frac{t}{l}}} = 1,72\sqrt[3]{P\rho : G\frac{t}{l}}. \qquad (1')$$

t longueur de l'arc décrit par chaque point du pourtour de l'une des sections par rapport aux points de l'autre section;
l longueur de la partie de l'arbre soumise à la torsion.

Avant d'adopter les dimensions ainsi déterminées, il faut s'assurer qu'elles répondent à des valeurs de F égales, au plus, aux efforts-limites qu'on peut faire subir à la matière composant l'arbre.

Les formules qui précèdent montrent que le moment de torsion $P\rho$ est indépendant de la longueur l de l'arbre, et la formule $t = \theta r l$ montre que t est proportionnel à l.

Pour les transmissions de mouvement non soumises à des chocs, comme, par exemple, celles des ateliers ordinaires de construction de machines, dans la formule (3) (p. 515), d étant exprimé en centimètres, et non en mètres comme dans ce qui précède, le coefficient K varie de 0,35 à 0,50.

Dimensions de quelques arbres de couche en fer.

Force en chevaux	1	2	3	4	5	6
Tours par minute	40	36	34	32	30	28
Diamètres en centimètres . .	2,5	4,4	5,1	5,1	7,6	8,3
Longueurs en mètres	2,32	2,44	2,44	2,44	2,44	2,62

De la comparaison des valeurs de F consignées aux tableaux pages 514 et 515, on peut déduire les valeurs de K à employer dans les différents exemples pour les arbres en acier ou en bois.

423. Résistance d'un arbre soumis à la fois à un effort de torsion et à un effort de flexion. Le théorème général de la superposition des effets des forces donne la solution de ce problème, que Bélanger résume ainsi :

« Lorsqu'un prisme est simplement soumis à un effort de torsion, la force F par unité de surface, résistant au glissement transversal des points les plus éloignés de l'axe du prisme, ne doit pas excéder certaines valeurs, que nous donnons au numéro précédent.

« Si le prisme subit seulement une flexion plane, les forces élastiques longitudinales R aux mêmes points les plus éloignés de l'axe ne doivent pas non plus dépasser les limites données au n° 399.

« Dans les machines, il arrive fréquemment qu'un arbre cylindrique subit simultanément les deux déformations dues à la torsion et à la flexion. Dans ce cas, une règle fort simple, et qui doit suffire dans la pratique, consiste à calculer, en fonction du rayon inconnu du cylindre et des forces connues, d'abord la force de glissement F par unité de surface, puis la tension R, aussi par unité de surface, et de s'imposer la condition que la résultante :

$$R' = \sqrt{F^2 + R^2}$$

des deux forces rectangulaires F et R (*Int.* 1524) n'excède pas la limite qu'on se donne quand le corps ne subit qu'une des deux déformations. Pour le fer forgé, par exemple, cette limite de R′ serait au plus de 6 kilogrammes par millimètre carré. Nous disons au plus, par la raison qu'une pièce tournante, fléchie alternativement dans les deux sens, est plus exposée à l'altération de son élasticité qu'une pièce toujours fléchie du même côté, comme dans les constructions sensiblement immobiles. »

Supposons un arbre à section circulaire reposant sur deux coussinets placés de niveau, et commandé à une extrémité, en dehors des coussinets, par un moment de torsion $P\rho$ (422); supposons de plus que cet arbre supporte entre ses coussinets un volant dont le poids est Q′ et une roue d'engrenage du poids Q″ qui reçoit de la part de l'engrenage qu'elle commande une réaction verticale q de haut en bas.

Du point où agit la puissance P au point de calage de la roue d'engrenage, l'arbre donne (422) :

$$F = \frac{16}{\pi d^3} P\rho .$$

L'arbre résiste par flexion aux forces verticales Q' et $Q'' + q$, en supposant que la réaction q agisse pour faire fléchir l'arbre comme le ferait une force égale appliquée sur l'axe au même point que le poids Q''. Appelant μ_m le plus grand moment fléchissant produit par l'ensemble des forces Q' et $Q'' + q$, plus grand moment qui a lieu au point d'application de Q' ou de $Q'' + q$ et généralement de Q', on a :

$$R = \frac{n}{I} \mu_m.$$

n et I ont les mêmes significations qu'au n° 399;

μ_m est égal à PL dans la formule (1) du n° 399, et à $\left(P + \frac{pL}{2}\right) \frac{ll'}{L}$ dans le cas, plus analogue à celui qui nous occupe, du n° 414.

Comme pour le cylindre de diamètre d, on a : $n = \frac{d}{2}$ et $I = \frac{\pi d^4}{4 \times 16}$ (*page* 473), la formule précédente devient :

$$R = \frac{16}{\pi d^3} \times 2\mu_m.$$

Admettant que $R' = 6 \times 10^6$, on peut donc poser :

$$6 \times 10^6 = \frac{16}{\pi d^3} \sqrt{(P\rho)^2 + 4(\mu_m)^2}.$$

La même formule peut servir à calculer le diamètre à donner à une section intermédiaire quelconque, en y remplaçant μ_m par le moment fléchissant dans cette section.

424. Tourillons. Des expériences de Buchanan il résulte que le diamètre d'un tourillon en fonte est, pour résister à la flexion, donné par la formule :

$$d = k \sqrt[3]{Q},$$

et celui des tourillons en fer par celle :

$$d = k \sqrt[3]{\frac{9}{14} Q} = 0,863 k \sqrt[3]{Q}.$$

d diamètre du tourillon, en centimètres;

k coefficient variable de 0,87 à 0,95 d'après les observations de Buchanan, et de 0,71 à 0,85 d'après celles de Tredgold. On pourra considérer la valeur maxima de Buchanan comme convenable aux tourillons soumis à des réactions brusques, comme ceux des arbres à cames; on pourra la réduire à 0,85 pour les roues hydrauliques. Dans les machines à vapeur, on peut faire, d'après Robertson, $k = 0,69$, en augmentant de 1/8 pour l'usure; cependant, cette règle donne des diamètres trop forts pour les machines d'une puissance supérieure à 20 chevaux;

Q charge du tourillon ou pression qu'il exerce sur son coussinet, exprimée en kilogrammes.

Ces deux formules font voir que la résistance à la flexion d'un tourillon en fonte est à celle d'un tourillon en fer de même diamètre dans le rapport de 9 à 14. Ainsi, faisant $k = 0,80$ pour la fonte, le diamètre d'un tourillon en fer placé dans les mêmes conditions sera donné par

la formule :

$$d = 0{,}80 \times 0{,}863 \sqrt[3]{Q} = 0{,}69 \sqrt[3]{Q}.$$

La longueur convenable des tourillons est, d'après Tredgold, égale à 1,2 fois le diamètre; ce sont en effet les proportions généralement adoptées dans la pratique, à l'exception des tourillons en fer dont le diamètre est inférieur à $0^m,07$, pour lesquels la longueur se prend le plus souvent égale à 1,5 fois le diamètre, on va même à 2 fois pour les petits diamètres.

Du cours de M. V. Contamin nous extrayons ce qui suit : Lorsque les tourillons terminent un arbre, ils sont soumis aux réactions exercées contre eux par les coussinets sur lesquels ils s'appuient par leurs poids, par celui de l'arbre et des organes qu'il supporte, et par les efforts exercés par les courroies et les dents engrenées contre ces organes. Lorsqu'ils ne terminent pas un arbre, mais qu'ils sont suivis par une autre portion d'arbre, ou par une portée cylindrique sur laquelle on cale une manivelle, ils peuvent avoir à résister, en outre des réactions provenant des coussinets, à des efforts de torsion dus aux organes qui actionnent les pièces montées sur ces parties cylindriques. Les dimensions à leur donner dépendent de ces diverses forces et de deux conditions d'établissement d'une très grande importance qui s'énoncent comme suit :

Les tourillons doivent être graissés convenablement pour résister à l'usure que produirait le frottement direct des métaux, et pour diminuer le travail perdu du fait de ce frottement. Pour que ces résultats, qui sont solidaires, soient atteints, il faut que les graisses puissent rester entre les parties en contact et qu'elles y conservent leurs propriétés physiques. Elles ne restent entre les surfaces en contact que si les pressions mutuelles entre ces surfaces ne sont pas tellement élevées que les corps lubrifiants soient expulsés, et elles n'y conservent leurs propriétés physiques que si la chaleur développée par le travail du frottement n'élève pas la température du milieu dans lequel elles se trouvent à un degré qui puisse les décomposer.

Si le tourillon termine un arbre, les réactions qu'il subit de la part du coussinet ont pour résultante une force unique égale et directement opposée à la résultante Q des pressions du tourillon sur le coussinet, résultante passant par le milieu de l'axe de ce tourillon, et un couple provenant du frottement des surfaces en contact. La réaction normale du coussinet s'exerce toujours sur toute la surface demi-cylindrique dont le diamètre est perpendiculaire à Q, et uniformément en tous les points de cette surface. On a donc :

$$Q = \sum N d\omega \cos\beta = N \sum d\omega \cos\beta = Nld;$$

d'où

$$N = \frac{Q}{ld}. \qquad (1)$$

Q pression totale du tourillon sur le coussinet;
N réaction normale du coussinet contre le tourillon, par unité de surface;

$d\omega$ élément de la surface de contact;
β angle de la normale à $d\omega$ avec la direction de Q;
$Nd\omega$ réaction normale de l'élément $d\omega$;
$Nd\omega \cos \beta$ projection de $Nd\omega$ sur la direction de Q;
Σ signifie somme;
$d\omega \cos \beta$ projection de l'élément $d\omega$ sur la surface perpendiculaire à Q, puisque β est aussi l'angle que fait $d\omega$ avec cette surface;
l longueur du tourillon et d son diamètre.

Pour que les corps lubrifiants interposés entre les surfaces en contact ne soient pas chassés, la valeur maximum de N ne doit pas dépasser 15 kilog. par centimètre carré pour la graisse, 20 kilog. pour l'huile et 10 kilog. pour l'eau. Dans le cas d'assemblage de bielle et de manivelle, le coussinet étant en bronze et le graissage se faisant à l'huile, N peut atteindre 40 kilog. par centimètre carré si le tourillon est en fer, et 60 kilog. s'il est en acier. La grandeur de ces deux dernières valeurs de N s'explique en remarquant que l'effort de la bielle ayant lieu alternativement dans un sens et dans l'autre, l'huile passe d'un côté à l'autre à la faveur du petit jeu qui doit toujours exister dans l'articulation.

La chaleur développée par le travail du frottement devant être dispersée par la conductibilité et le rayonnement des pièces frottantes, sous un excédent de température qui a été reconnu ne pas devoir dépasser 45°, il faut que la longueur des tourillons, et par suite la surface qui rayonne, soient proportionnelles au travail total développé par le frottement des corps en contact.

L'expérience apprend que l'excès de température de 45° n'est pas dépassé toutes les fois que le travail du frottement par unité de surface est au plus égal à 15000 kilogrammètres. On doit donc avoir :

$$15000 \geqslant fNv.$$

f coefficient de frottement (56, 59);
v vitesse au pourtour du tourillon par seconde.

Remplaçant dans cette expression N par sa valeur précédente en fonction de Q, et faisant $v = \frac{\pi d n}{60}$, n étant le nombre de tours de l'arbre par minute, on a :

$$15000 \geqslant \frac{f\pi n Q}{60 l}, \quad \text{d'où} \quad l \geqslant 0{,}0000034 fnQ. \qquad (2)$$

La condition relative à l'échauffement est, comme on le voit, indépendante du diamètre d; cela s'explique en remarquant que si la pression N par unité de surface est en raison inverse du diamètre d, la vitesse v est au contraire proportionnelle à d, et que, par suite, ce diamètre disparaît, comme facteur commun, dans le produit fNv.

La longueur l à donner au tourillon dépend du coefficient de frottement, lequel est pour les tourillons en fer tournant dans des coussinets en bronze :

Graissage à l'huile	. . . .	$f=0{,}05$
—	au cambouis d'huile	$f=0{,}09$
—	à l'eau et à la graisse	$f=0{,}19$
—	à l'eau seule	$f=0{,}25$

Les équations (1) et (2) ne peuvent pas déterminer seules les dimensions qu'il faut donner aux tourillons, puisqu'elles ne satisfont pas aux conditions relatives à la résistance. Les formules qui expriment ces conditions se partagent en deux classes, suivant que le tourillon n'a à résister qu'à la flexion, ou suivant qu'il a à résister simultanément à la flexion et à la torsion. S'il s'agit d'un arbre travaillant dans les conditions de celui dont il est question au n° 423, le tourillon opposé à l'effort de torsion P n'est soumis qu'à un effort de flexion produit par la réaction égale et contraire à la résultante Q des composantes obtenues en décomposant chacune des forces Q' et $Q'' + q$ en deux forces appliquées au milieu de la longueur des tourillons, et il se calcule à l'aide de la relation (399 et 423) :

$$Q\frac{l}{2} = \frac{I}{n}R, \quad \text{d'où} \quad R = \frac{Qln}{2I} = \frac{5,095Ql}{d^3},$$

et

$$d = 1,72\sqrt[3]{\frac{Ql}{R}}. \qquad (3)$$

Quant au tourillon voisin de P, qui est soumis simultanément à un effort de flexion et à un effort de torsion, on le calculera à l'aide de la formule (423) :

$$R' = \frac{16}{\pi d^3}\sqrt{(P\rho)^2 + 4(\mu_m)^2}.$$

On obtient ainsi une troisième relation qui, avec celles (1) et (2), permet, dans chacun des cas qui peuvent se présenter, de déterminer les deux dimensions l et d à donner au tourillon.

Si le tourillon n'a à résister qu'à un effort de flexion, par exemple, des équations (1) et (3) on déduit ses deux dimensions à la condition qu'elles satisfassent à l'inégalité (2).

Des équations (1) et (3) on déduit :

$$d = \sqrt[4]{\frac{5,095Q^2}{NR}}, \quad l = \sqrt[4]{\frac{Q^2R}{5,095N^3}},$$

et, par suite :

$$\frac{l}{d} = \sqrt{\frac{R}{5,095N}}.$$

Prenant $N = 150\,000$ et supposant le tourillon en fer, cette dernière formule donne, pour le cas où $R = 4 \times 10^6$:

$$l = 2,28d.$$

Si, le graissage se faisant à l'huile, on a $N = 200\,000$, la même formule donne :

$$l = 1,97d.$$

Enfin si, le graissage se faisant à l'huile, le tourillon est en acier et que $R = 8 \times 10^6$, on obtient :

$$l = 2,77d.$$

425. Dimensions des balanciers. — On peut considérer un balancier comme étant un solide reposant sur un appui placé au milieu de sa longueur et chargé à ses deux extrémités ; on obtiendra donc ses dimensions, en négligeant les nervures, que l'on ne considère que comme une garantie de solidité, au moyen de la formule :

$$\frac{PL}{2} = \frac{Rbh^2}{6}.$$

P force réelle qui sollicite chaque extrémité du balancier en kilogrammes ;
L distance des points d'application des deux forces P ;
R = 7000000 pour la fonte (399 et 416) ; mais il convient, dans ce cas de mouvement, de faire R égal à 1/6 de la résistance absolue, c'est-à-dire à 4670000 ;
b épaisseur horizontale du balancier en mètres ;
h hauteur du balancier au milieu de sa longueur, en mètres.

L'épaisseur *b* de la *toile* ou *panneau*, non compris les nervures, est uniforme sur toute la longueur du balancier, et varie de 1/12 à 1/15 de la hauteur *h* ; cependant, pour les panneaux, où l'on supprime les nervures, *b* est quelquefois égal à 1/6 et même à 1/5 de *h*.

La longueur L est ordinairement égale à trois fois la course du piston.

On donne au balancier la forme parabolique (417 et *Int.* 1213), et, afin de pouvoir fixer les petits arbres qu'il porte à ses extrémités, on le termine par des manchons dont le rayon extérieur est égal au rayon intérieur multiplié par 5/2 ; ces manchons sont raccordés avec les arcs de parabole par des droites ou des courbes. Au lieu de faire passer les arcs de parabole par les centres des manchons, comme l'indique la théorie, on les fait quelquefois passer par les points extérieurs de ces manchons, c'est-à-dire par les points extrêmes du balancier. Souvent même on se contente de tracer des arcs de cercle tangents aux circonférences extérieures des deux manchons, et passant par les points extrêmes de la hauteur *h*.

La saillie des nervures varie de 2/3 de l'épaisseur *b* du balancier à une fois cette épaisseur.

La longueur totale des moyeux recevant les différents axes fixés au balancier varie de 1,5 à 2 fois le diamètre de ces axes. Ce diamètre est égal à 1,2 fois celui des tourillons, et celui-ci se calcule comme il a été indiqué au n° 424. La longueur du grand moyeu varie ordinairement entre 2/5 et 1/2 de *h*.

Lorsque la puissance de la machine dépasse 100 à 150 chevaux, il convient de faire le balancier en fer.

426. Dimensions des manivelles (86 et suivants). On peut considérer une manivelle comme étant un solide encastré par une de ses extrémités et sollicité à l'autre par une certaine force. On obtiendra donc ses dimensions, en négligeant les nervures, au moyen de la formule (399) :

$$PL = \frac{Rbh^2}{6}.$$

P force agissant à l'extrémité de la manivelle ;

L longueur de la manivelle ;
R = 7000000 (399 et 416) ; mais il convient, comme dans le numéro précédent, de faire R = 4670000 pour les manivelles en fonte ;
b épaisseur de la manivelle, en mètres;
h hauteur de la manivelle au point d'encastrement, en mètres.

On donne à l'épaisseur b, qui est uniforme sur toute la longueur de la manivelle, de 1/6 à 1/5 de h; seulement, on renforce b par une nervure qui joint les extrémités des manchons que porte la manivelle.

On donne à la manivelle la forme parabolique (417 et *Int.* 1213), et l'on raccorde les deux manchons aux arcs de parabole par des arcs de cercle tangents aux manchons et aux arcs de parabole.

Aujourd'hui, les manivelles se font à peu près exclusivement en fer; elles ne portent pas de nervure, mais leur épaisseur b va en diminuant depuis l'arbre moteur jusqu'au manchon du maneton. La hauteur h, au lieu d'être limitée à des arcs de parabole, l'est à des droites. Sur toutes les faces, le corps de la manivelle se profile ainsi suivant des droites. Le manchon qui reçoit l'arbre moteur a un rayon extérieur égal à 1,8 et jusqu'à 2,2 fois le rayon intérieur; le manchon qui reçoit le maneton a un rayon extérieur égal à 2 et jusqu'à 2,5 fois le rayon intérieur.

La longueur de ces manchons est ordinairement égale à 1,2 fois leur diamètre intérieur.

Le diamètre de maneton se calcule comme il a été indiqué au n° 424, et celui de l'arbre moteur comme aux n°s 422 et 423.

427. Dents de roue d'engrenage (82 et suivants). On peut considérer une dent d'engrenage comme étant un solide encastré par une de ses extrémités et sollicité à l'autre par un certain effort; ses dimensions seront donc données par la formule (399) :

$$PL = \frac{Rbh^2}{6}.$$

P pression que supporte la dent en kilogrammes; on suppose P égal à la pression totale d'une roue d'engrenage sur l'autre, et appliquée à l'extrémité de la dent, cas le plus favorable à la rupture;
L longueur de la dent, c'est sa saillie sur la jante;
b largeur de la dent;
h hauteur ou épaisseur de la dent, suivant la circonférence de la roue;
R = 7000000; mais les dents d'engrenage étant soumises à des chocs, il résulte des observations de Tredgold qu'il convient de faire R = 1500000 pour les dents en fonte. On admet que R ne doit pas dépasser 1000000 si les dents en fonte sont exposées à des chocs, et que R peut atteindre la limite 2000000 dans le cas contraire. Pour les dents en fer, on fait R = 3000000 ou R = 5000000 selon que les dents sont ou ne sont pas exposées à des chocs. Pour les dents en bois les valeurs correspondantes de R sont 300000 et 600000 ($0^k,3$ à $0^k,6$ *par millim. carré*).

Remplaçant R par la valeur 1500000 (*de Tredgold*) dans la formule précédente, on a :

$$PL = 250000\,bh^2.$$

Pour des roues faites avec soin et transmettant un effort régulier, on

peut poser :

$$PL = 300\,000\,bh^2.$$

Dans la pratique on fait $L = 1{,}2h$ pour les engrenages qui transmettent de grands efforts, et $L = 1{,}5h$ pour ceux qui ne transmettent que de faibles charges.

La valeur de b est comprise entre $6h$ et $3h$, suivant que P est plus ou moins grand ; c'est ce qu'indique le tableau suivant :

Valeurs de P en kilog.	Valeurs relatives de b et h.
100 à 250	$b=3{,}0h$
250 à 500	$b=3{,}5h$
500 à 800	$b=4{,}0h$
800 à 1200	$b=5{,}0h$
1200 à 2000	$b=5{,}5h$
2000 à 3000	$b=6{,}0h$

Ces nombres répondent à peu près à la formule empirique :

$$\frac{b}{h} = \frac{1}{2}\sqrt[3]{P}.$$

Pour les dents en bois durs, tels que charme, racine de poirier, de sorbier..., on peut conserver entre L, b et h les mêmes relations que pour la fonte et poser, pour un travail très régulier :

$$PL = 145\,000\,bh^2.$$

Épaisseur h, *en millimètres, des dents de roues d'engrenage en fonte.*

FORCE en chevaux.	VITESSE PAR SECONDE A LA CIRCONFÉRENCE.					
	$0^m{,}50$	$1^m{,}00$	$1^m{,}50$	$2^m{,}00$	$2^m{,}50$	$3^m{,}00$
	millim.	millim.	millim.	millim.	millim.	millim.
1	12	8	7	6	»	»
2	17	12	10	9	8	7
3	21	15	12	11	10	9
4	24	17	14	12	11	10
5	27	19	15	14	12	11
6	30	21	17	15	13	12
7	32	22	18	16	14	13
8	34	24	20	17	15	14
9	36	26	21	18	16	15
10	38	27	22	19	17	16
12	40	30	24	21	18	17
14	45	32	26	22	20	18
16	49	34	28	24	21	20
18	51	36	30	26	23	21
20	54	38	31	27	24	22
25	»	43	35	30	27	25
30	»	47	38	33	30	27
35	»	51	41	36	32	29
40	»	54	44	38	34	31

428. Jante de roue d'engrenage. Sa largeur est égale à celle de la

dent, et son épaisseur e résulte généralement de la formule empirique $e = 1{,}2h$, h étant l'épaisseur de la dent. La nervure intérieure qui soutient la couronne a le même profil que les dents.

Pour les roues soumises à des chocs, ou transmettant des efforts qui exigeraient des valeurs de h trop considérables, on renforce la jante par des joues qui emboîtent les dents, de manière à ne laisser que $0^m{,}010$ ou $0^m{,}012$ de jeu entre les joues des deux roues engrenées; l'épaisseur de ces joues varie de 1/2 aux 2/3 de l'épaisseur h de la dent. L'écartement des deux joues d'une même roue se fait égal à la largeur b des dents de l'autre roue, plus un jeu de $0^m{,}006$ à $0^m{,}008$.

Pour les roues à dents de bois, la largeur totale de la jante est égale à la largeur b des dents, augmentée de part et d'autre de la dent d'une quantité égale à l'épaisseur h de la dent. L'épaisseur de la jante se fait égale à $1{,}25\ h$.

La queue de la dent a de 4 à 6 millimètres de moins que la dent, dans le sens de la circonférence, et de 8 à 10 parallèlement à l'axe. Ces queues font saillie de $0^m{,}02$ à $0^m{,}025$ à l'intérieur de la jante, où on les taille en queue d'hironde, de manière à pouvoir serrer les dents avec des coins.

429. Bras de roue d'engrenage. Pour des roues d'engrenage de $1^m{,}30$ de diamètre et au-dessous, il suffit de quatre bras; pour des diamètres de $1^m{,}30$ à $2^m{,}50$, on en emploie six; pour ceux de $2^m{,}50$ à 5 mètres, huit, et pour ceux de 5 mètres à 7 mètres, dix. Le nombre des bras ne dépend pas seulement du diamètre de la roue, mais aussi des proportions de la couronne, qui demande à être d'autant mieux soutenue, soit pour son coulage, soit pour son service, qu'elle est plus légère.

On peut encore, jusqu'à un certain point, considérer un bras comme étant un solide encastré par une extrémité et sollicité à l'autre par une certaine force; ainsi, en supposant que les nervures ne font que résister aux efforts latéraux, on peut poser :

$$PL = \frac{Rbh^2}{6}. \qquad (399)$$

P effort tangentiel à la roue, et que l'on suppose appliqué à un seul bras;
L longueur totale du bras, mesurée depuis le moyeu jusqu'au point d'application de P;
b épaisseur du bras; elle varie ordinairement entre 1/4 et 1/5 de h;
h hauteur du bras près du moyeu; c'est sa dimension suivant la direction de l'effort qui tend à le rompre;
R = 7 000 000, comme pour une pièce encastrée par une extrémité.

L'épaisseur des nervures est environ les 2/3 de celle du bras, et l'une et l'autre sont uniformes sur toute la longueur du bras. Les arêtes du bras sont droites, et la hauteur h' près de la jante varie entre les 2/3 et les 3/4 de la hauteur h près du moyeu.

La largeur du bras, comptée sur les nervures, se fait à peu près égale à la hauteur h du corps du bras.

430. Moyeu de roue d'engrenage. Pour les petits engrenages, on fait la longueur l du moyeu égale à la largeur b de la jante. Si leur diamètre

dépasse $0^m,50$, on augmente l d'une quantité proportionnelle au rayon ρ de la roue, afin d'augmenter la stabilité de celle-ci sur son arbre ; on prend alors :

$$l = b + 0,05\rho.$$

L'épaisseur du moyeu doit être suffisante pour recevoir l'assemblage à clavette tangentielle ou engagée, sans qu'il puisse être rompu par le serrage de cette clavette. Pour calculer cette épaisseur, on suppose qu'il n'y a de contact entre le moyeu et l'arbre que sur la demi-circonférence opposée à la clavette. Cette hypothèse admise, il faut, pour que l'arbre ne tourne pas dans le moyeu, que le moment de la pression P exercée contre les dents de la roue soit au plus égal au moment du frottement entre les surfaces en contact, c'est-à-dire qu'on ait au maximum :

$$P\rho = fN\frac{\pi d}{2}l \times \frac{d}{2} = fN\frac{\pi d^2}{4}l,$$

d'où :

$$N = \frac{4P\rho}{f\pi d^2 l}.$$

f coefficient du frottement de l'arbre dans le moyeu ; on peut approximativement faire $f = 0,10$;
N pression entre les surfaces de contact, par unité de surface ;
d diamètre intérieur du moyeu.

N étant calculé, appelant Q l'effort qui tend à séparer l'une de l'autre les deux moitiés du moyeu, on a (424) :

$$Q = Nld = \frac{4P\rho}{f\pi d}.$$

Or, on a :

$$Q = \frac{4P\rho}{f\pi d} = 2elR, \quad \text{d'où} \quad e = \frac{2P\rho}{f\pi d l R}.$$

e épaisseur du moyeu ;
R plus grand effort par extension auquel on peut soumettre la matière qui compose le moyeu, par unité de surface.

Quant à la clavette, elle doit résister à une compression totale, suivant le rayon, égale à Q ; donc on peut poser :

$$hlR' = \frac{4P\rho}{f\pi d}, \quad \text{d'où} \quad h = \frac{4P\rho}{f\pi d l R'}.$$

h largeur de la clavette, ou dimension perpendiculaire au rayon ;
hl section comprimée ;
R′ plus grand effort de compression auquel on peut soumettre les corps en contact.

Dans le cas d'un moyeu en fonte et d'une clavette en fer, on peut prendre en toute sécurité $R' = 3R$; valeur qui donne $h = \frac{2}{3}e$.

431. Boulons et écrous. M. Armengaud aîné, de la discussion des proportions adoptées par divers constructeurs et ingénieurs, a formé le tableau suivant pour les vis et boulons à filets triangulaires. La dernière colonne donne les tractions longitudinales que l'on fait supporter aux boulons (374).

DIAMÈTRE extérieur	DIAMÈTRE au fond des filets.	PROFONDEUR des filets.	PAS.	DIAMÈTRE extérieur de l'écrou à 6 pans.	HAUTEUR de l'écrou.	HAUTEUR de la tête du boulon.	TRACTION longitudinale.
millim.	millim.	millim.	millim.	millim.	millim.	millim.	kilog.
5	3,2	0,9	1,4	13,7	5	6	20
7,5	5,5	1,0	1,6	17	7,5	7,5	45
10	7,7	1,1	1,8	22	10	9,5	81
12,5	9,9	1,3	2,0	26	12,5	11	126
15	12,2	1,4	2,2	30	15	13	182
17,5	14,5	1,5	2,4	35	17,5	14,5	248
20	16,7	1,6	2,6	38	20	16,5	324
22,5	19,1	1,7	2,8	42	22,5	18	410
25	21,2	1,9	3,0	46	25	20	506
30	25,7	2,1	3,4	54	30	23,5	729
35	30,2	2,4	3,8	62	35	27	992
40	34,7	2,6	4,2	70	40	30,5	1296
45	39,2	2,9	4,6	78	45	34	1640
50	43,7	3,2	5,0	86	50	37,5	2025
55	48,0	3,5	5,4	94	55	41	2450
60	52,4	3,8	5,8	102	60	44,5	2916
65	56,8	4,1	6,2	110	65	48	3422
70	61,1	4,4	6,6	118	70	51,5	3969
75	65,5	4,7	7,0	126	75	55	4556
80	69,9	5,0	7,4	134	80	58,5	5184

Le même auteur indique les dimensions suivantes pour les vis et les boulons à filets carrés :

DIAMÈTRE extérieur.	PROFONDEUR des filets.	PAS.	ÉPAISSEUR des filets.	HAUTEUR de l'écrou.	TRACTION longitudinale.
millim.	millim.	millim.	millim.	millim.	kilog.
20	1,80	3,80	1,90	45,6	324
25	2,02	4,25	2,12	51,0	506
30	2,23	4,70	2,35	56,4	729
35	2,45	5,15	2,57	61,8	992
40	2,66	5,60	2,80	67,2	1296
45	2,87	6,05	3,02	72,6	1640
50	3,19	6,50	3,25	78,0	2025
55	3,30	6,95	3,47	83,4	2450
60	3,51	7,40	3,70	88,8	2916
65	3,73	7,85	3,92	94,2	3422
70	3,94	8,30	4,15	99,6	3969
75	4,16	8,75	4,37	105,0	4556
80	4,37	9,20	4,60	110,4	5184
85	4,58	9,65	4,82	115,8	5852
90	4,80	10,10	5,05	121,2	6561
95	5,01	10,55	5,27	126,6	7300
100	5,22	11,00	5,50	132,0	8100
105	5,44	11,45	5,72	137,4	8930
110	5,65	11,90	5,95	142,8	9801
115	5,87	12,35	6,17	148,2	10712
120	6,08	12,80	6,40	153,6	11664

Rosettes. Les rosettes placées sous la tête des boulons sont percées d'un trou carré, et celles placées sous les écrous le sont d'un trou rond.

		mill.	mill.	mill.	mill.	mill.	mill.
Diamètre		108	84	58	48	34	26
Épaisseur		7	6	4	3	1	1
Largeur du chanfrein au vif		12	10	6	4	»	»
Trous des rosettes.	Équarrissage.	30	26	20	16	»	»
	Diamètre.	28	24	19	15	11	9

432. Dimensions des vis à bois *à tête fraisée et à tête ronde, d'après la série Japy.*

NUMÉROS.	DIAMÈTRES DU CORPS		PAS.	TÊTE				TYPES DES LONGUEURS en millimètres.
	extérieur.	intérieur.		fraisée.		ronde.		
				Diam.	Haut.	Diam.	Haut.	
	millim.	millim.	mill.	mill.	mill.	mill.	mill.	
10	1,5	0,8	0,6	3,4	0,9	3,0	1,4	5, 7 et 10
11	1,6	1,1	0,8	3,5	1,0	3,2	1,6	5, 7, 10 et 13
12	1,8	1,1	0,8	3,7	1,0	3,7	1,8	5, 7, 10, 13 et 15
13	1,9	1,4	0,9	4,0	1,0	4,0	2,0	5, 7, 10, 13, 15 et 17
14	2,1	1,4	1,0	4,3	1,2	4,3	2,2	5, 7, 10, 13, 15, 17 et 20
15	2,4	1,5	1,0	5,2	1,4	4,6	2,4	5 à 17, 20, 25 et 30
16	2,7	1,5	1,25	5,7	1,6	5,2	2,6	5 à 17, 20 à 35
17	2,95	1,9	1,4	6,0	1,8	5,7	2,8	5 à 17, 20 à 40
18	3,3	2,4	1,4	7,0	1,8	7,0	2,8	5 à 17, 20 à 45
19	3,7	2,4	1,5	8,2	2,4	8,0	3,8	5 à 17, 20 à 50
20	4,1	2,8	1,7	9,0	2,6	8,5	3,8	10 à 17, 20, 55 et 60
21	4,6	3,0	1,8	9,8	2,8	10,0	4,2	13 à 17, 20, 60 et 70
22	5,1	3,7	2,2	11,0	3,0	10,7	4,8	20 à 70, 80, 90 et 100
23	5,6	4,0	2,4	12,8	3,6	12,0	4,8	20 à 70, 80, 90 et 100
24	6,2	4,3	2,65	13,5	3,9	13,0	5,3	25 à 70, 80, 90 et 100
25	6,9	4,6	3,05	15,0	4,2	14,0	6,5	35 à 70, 80, 90 et 100
26	7,6	4,8	3,05	16,5	4,6	15,5	6,5	40 à 70, 80, 90 et 100
27	8,4	5,7	3,45	18,0	5,0	17,5	6,0	40 à 70, 80, 90 et 100
28	9,1	6,1	3,45	20,0	5,5	19,0	7,0	45 à 70, 80, 90 et 100
29	10,0	7,0	3,75	21,0	5,6	20,0	7,0	50 à 70, 80, 90, 100 et 110
30	10,8	7,0	3,75	22,5	6,0	22,0	8,5	50 à 70, 80, 90, 100 et 110

Vis à bois en cuivre. On trouve aussi dans le commerce des vis à bois en cuivre d'un grand nombre de dimensions comme longueur et diamètre. Elles servent surtout dans le cas où les bois ne doivent pas recevoir de peinture où lorsque, suivant les usages, on redoute la rouille. Les petits échantillons de vis en cuivre servent particulièrement dans la confection des meubles et des objets en bois de luxe. On en fait à tête ronde et à tête plate. Elles accompagnent ordinairement des charnières en cuivre.

Dimensions des tire-fonds ou vis à bois à tête carrée, d'après la série Japy.

DIAMÈTRE du corps.		PAS.	LONGUEUR		TÊTE.		DIAMÈTRE du corps.		PAS.	LONGUEUR		TÊTE.	
Extérieur.	Intérieur.		totale.	taraudée.	Largeur.	Épaisseur.	Extérieur.	Intérieur.		totale.	taraudée.	Largeur.	Épaisseur.
mill.	mill.	mill.	mill.	mill	mill	mill.	mill.	mill.	mill.	mill.	mill.	mill.	mill.
7	4,7	2,1	30	18	13	7	12	8,0	4,6	140	70	22	11
			40	22						160	75		
			50	30						180	85		
8	4,8	3,0	50	30	15	8	14	9,2	4,97	160	73	25	13
			60	35						200	83		
			70	37						220	80		
9	6,1	3,36	70	37	17	9	16	11,0	5,68	180	80	28	14
			80	42						220	90		
			90	47						240	90		
10	6,5	3,7	90	47	18	10	18	12,3	7,8	140	70	32	16
			100	56						200	85		
			110	58						300	90		
11	7,1	4,6	110	60	20	11							
			120	65									
			140	70									

433. Classification des fils de fer *suivant la jauge de Limoges.*

NUMÉROS.	DIAMÈTRE en millim.	NUMÉROS.	DIAMÈTRE en millim.	NUMÉROS.	DIAMÈTRE en millim.	NUMÉROS.	DIAMÈTRE. en millim.
0	0,39	7	1,12	13	1,91	19	3,95
1	0,45	8	1,24	14	2,02	20	4,50
2	0,56	9	1,35	15	2,14	21	5,10
3	0,67	10	1,46	16	2,25	22	5,65
4	0,79	11	1,68	17	2,84	23	6,20
5	0,90	12	1,80	18	3,40	24	6,80
6	1,01						

433 *bis. Classification des fils, suivant la jauge de Paris* (1857).

NUMÉROS	DIAMÈTRE en millimèt.	NUMÉROS	DIAMÈTRE en millimèt.	NUMÉROS	DIAMÈTRE en millimèt.	NUMÉROS	DIAMÈTRE en millimèt.
P 15	0,15	P 2	0,42	10	1,50	22	5,40
P 14	0,16	P 1	0,46	11	1,60	23	5,90
P 13	0,17	P	0,50	12	1,80	24	6,40
P 12	0,18	1	0,60	13	2,00	25	7,00
P 11	0,20	2	0,70	14	2,20	26	7,60
P 10	0,22	3	0,80	15	2,40	27	8,20
P 9	0,23	4	0,90	16	2,70	28	8,80
P 8	0,25	5	1,00	17	3,00	29	9,40
P 7	0,27	6	1,10	18	3,40	30	10,00
P 6	0,28	7	1,20	19	3,90		
P 5	0,31	8	1,30	20	4,40		
P 4	0,34	9	1,40	21	4,90		

434. *Diamètre des fils, suivant la jauge carcasse ou du commerce.*

NUMÉROS	DIAMÈTRE en millimèt.	NUMÉROS	DIAMÈTRE en millimèt.	NUMÉROS	DIAMÈTRE en millimèt.	NUMÉROS	DIAMÈTRE en millimèt.
P	0,50	22	0,32	34	0,14	46	0,07
12	0,47	24	0,29	36	0,12	48	0,06
14	0,44	26	0,26	38	0,11	50	0,05
16	0,40	28	0,22	40	0,10		
18	0,37	30	0,20	42	0,09		
20	0,34	32	0,17	44	0,08		

435. *Diamètre des fils, suivant la jauge de Birmingham ou jauge B. W. G.*

NUMÉROS	DIAMÈTRE en millimèt.	NUMÉROS	DIAMÈTRE en millimèt.	NUMÉROS	DIAMÈTRE en millimèt.	NUMÉROS	DIAMÈTRE en millimèt.
0000	11,531	7	4,572	17	1,473	27	0,406
000	10,795	8	4,191	18	1,245	28	0,356
00	9,652	9	3,759	19	1,067	29	0,330
0	8,636	10	3,404	20	0,889	30	0,305
1	7,620	11	3,048	21	0,813	31	0,254
2	7,213	12	2,769	22	0,711	32	0,229
3	6,579	13	2,413	23	0,635	33	0,203
4	6,045	14	2,108	24	0,559	34	0,178
5	5,588	15	1,829	25	0,508	35	0,127
6	5,154	16	1,651	26	0,457	36	0,102

436. **Tôles.** Les tôles fortes employées à la construction des chaudières à vapeur proviennent de fer de fonte au bois, affiné au bois. Les feuilles ont de 1 à 3 mètres de longueur sur 0^{m},325 à 1^{m},50 de largeur, et leur épaisseur varie de millimètre en millimètre depuis 4 jusqu'à 15 (371 et 443).

Les tôles de fer de fonte au bois, affiné à la houille, sont employées à la confection des tuyaux de poêles, des cheminées, des toitures, etc.

437. **Fer-blanc.** La tôle est en fer de fonte au bois, affinée au bois. Les feuilles, laminées à l'épaisseur convenable, sont décapées, étamées, lavées et polies. Elles s'expédient en caisses de 100, 150, 200 et 225 feuilles, dont les dimensions et poids sont les suivants :

NOMBRE de feuilles.	DIMENSION DES FEUILLES. Longueur.	Largeur.	POIDS BRUTS des caisses.
	m.	m.	kil.
100	0,435	0,325	48 à 69
100	0,490	0,350	73 à 85
150	0,405	0,310	78 à 103
150	0,325	0,245	28 à 53
200	0,380	0,270	67 à 87
225	0,350	0,260	58 à 88

438. Classification des fers, d'après Flachat. (Voir n° 378.)

DÉNOMINATION.	LARGEUR.	ÉPAISSEUR.	DIAMÈTRE.	CÔTÉ.
	mill.	mill.	mill.	mill.
Fers marchands plats.	40 à 160	10 et au-dessus	»	»
Id. méplats. . .	25 à 40	15 *id.*	»	»
Id. carrés. . . .	»	»	»	35 à 100
Fers de petite forge, plats. .	25 à 40	8 à 9	»	»
Id. méplats. . .	25 à 30	9 à 11	»	»
Id. carrés. . . .	»	»	»	19 à 20
Martinets ronds.	»	»	10 à 100	»
Carillons.	»	»	»	10 à 20
Bandelettes.	15 à 40	5 à 7	»	»
Fenderie, verges.	5 à 25	6 à 14	»	»
Aplatis pour carrosserie. . .	40 à 70	6 et au-dessus	»	»
Aplatis pour cuves.	25 à 100	3 à 8	»	»

439. Tableau du poids des fers carrés, *par mètre de longueur.*

CÔTÉ.	POIDS.	CÔTÉ.	POIDS.	CÔTÉ.	POIDS.	CÔTÉ.	POIDS.	CÔTÉ.	POIDS.	CÔTÉ.	POIDS.
mil.	kil.	mil.	kil.	mil.	kil.	mil.	kil.	mil.	kil.	mil.	kil.
1	0,008	20	3,115	39	11,806	57	25,303	75	43,806	93	67,358
2	0,031	21	3,435	40	12,461	58	26,199	76	44,983	94	68,815
3	0,070	22	3,769	41	13,092	59	27,110	77	46,176	95	70,287
4	0,125	23	4,120	42	13,738	60	28,036	78	47,382	96	71,774
5	0,195	24	4,486	43	14,400	61	28,979	78	48,605	97	73,262
6	0,280	25	4,868	44	15,078	62	29,937	80	49,843	98	74,776
7	0,382	26	5,265	45	15,771	63	30,911	81	51,097	99	76,330
8	0,498	27	5,677	46	16,479	64	31,900	82	52,367	100	77,880
9	0,631	28	6,106	47	17,204	65	32,884	83	53,632	101	79,445
10	0,779	29	6,550	48	17,944	66	33,925	84	54,952	102	81,026
11	0,942	30	7,009	49	18,699	67	34,960	85	56,208	103	82,623
12	1,121	31	7,484	50	19,470	68	36,012	86	57,600	104	84,235
13	1,316	32	7,975	51	20,257	69	37,079	87	58,947	105	85,863
14	1,526	33	8,481	52	21,059	70	38,161	88	60,310	106	87,506
15	1,752	34	9,003	53	21,876	71	39,259	88	61,689	107	89,164
16	1,994	35	9,540	54	22,710	72	40,373	90	63,088	108	90,839
17	2,251	36	10,093	55	23,559	73	41,502	91	64,486	109	92,529
18	2,523	37	10,662	56	24,423	74	42,647	92	65,916	110	94,235
19	2,811	38	11,246								

439 *bis*. Poids et dimensions des fers Zorès (*en* U *renversé*).

HAUTEURS des fers	LARGEURS à la base	LARGEUR en haut	POIDS par mètre
millim.			kilog.
80	100	30	7,00
100	120	35	10,50
120	140	40	15,50
140	160	45	20,00
160	180	50	25,00
180	200	55	32,00
200	220	80	39,50

440. Tableau des poids des fers ronds, *par mètre de longueur.*

DIAMÈTRE.	POIDS.	DIAMÈTRE.	POIDS.	DIAMÈTRE.	POIDS.	DIAMÈTRE.	POIDS	DIAMÈTRE.	POIDS.	DIAMÈTRE.	POIDS.
mil.	kil.	mil.	kil.	mil.	kil.	mil.	kil.	mil.	kil.	mil.	kil.
2	0,024	19	2,209	36	7,930	53	17,188	69	29,133	85	44,210
3	0,055	20	2,448	37	8,377	54	17,843	70	29,983	86	45,256
4	0,098	21	2,698	38	8,836	55	18,510	71	30,846	87	46,315
5	0,158	22	2,962	39	9,307	56	19,189	72	31,721	88	47,386
6	0,220	23	3,237	40	9,790	57	19,881	73	32,548	89	48,469
7	0,300	24	3,525	41	10,286	58	20,584	74	33,508	90	49,563
8	0,392	25	3,824	42	10,794	59	21,300	75	34,119	91	50,271
9	0,496	26	4,136	43	11,314	60	22,028	76	35,343	92	51,791
10	0,612	27	4,461	44	11,846	61	22,769	77	36,288	93	52,923
11	0,740	28	4,797	45	12,391	62	23,521	78	37,228	94	54,607
12	0,881	29	5,146	46	12,948	63	24,286	79	38,189	95	55,224
13	1,034	30	5,507	47	13,517	64	25,063	80	39,162	96	56,393
14	1,199	31	5,880	48	14,098	65	25,853	81	40,147	97	57,574
15	1,377	32	6,266	49	14,692	66	26,654	82	41,144	98	58,644
16	1,566	33	6,664	50	15,296	67	27,468	83	42,154	99	59,970
17	1,768	34	7,074	51	15,916	68	28,294	84	43,176	100	61,190
18	1,983	35	7,496	52	16,546						

441. Cornières égales.
Poids approximatifs par mètre.

Cornières égales.
Poids approximatifs par mètre.

DIMENSIONS en millimètres.	POIDS par mètre.	DIMENSIONS en millimètres.	POIDS par mètre.	DIMENSIONS en millimètres.	POIDS par mètre.	DIMENSIONS en millimètres.	POIDS par mètre.
	kil.		kil.		kil.		kil.
$\frac{40 \times 40}{5}$	2,90	$\frac{40 \times 40}{8}$	4,60	$\frac{45 \times 20}{5}$	2,50	$\frac{100 \times 80}{12}$	15,00
$\frac{50 \times 50}{6}$	4,40	$\frac{50 \times 50}{9}$	6,60	$\frac{55 \times 45}{6}$	4,40	$\frac{110 \times 65}{10}$	12,50
$\frac{55 \times 55}{7}$	5,50	$\frac{55 \times 55}{9}$	7,00	$\frac{60 \times 35}{8}$	6,50	$\frac{120 \times 80}{13}$	19,00
$\frac{60 \times 60}{8}$	7,00	$\frac{60 \times 60}{10}$	9,00	$\frac{70 \times 35}{5}$	4,00	$\frac{120 \times 90}{14}$	21,00
$\frac{65 \times 65}{9}$	8,40	$\frac{65 \times 65}{11}$	9,80	$\frac{70 \times 40}{8}$	7,00	$\frac{125 \times 80}{9}$	13,60
$\frac{70 \times 70}{9}$	9,40	$\frac{70 \times 70}{12}$	12,00	$\frac{70 \times 50}{7}$	6,20	$\frac{130 \times 90}{13}$	21,00
$\frac{75 \times 75}{9}$	10,00	$\frac{75 \times 75}{13}$	14,00	$\frac{80 \times 50}{9}$	8,00	$\frac{140 \times 80}{14}$	22,00
$\frac{80 \times 80}{10}$	11,50	$\frac{80 \times 80}{14}$	15,50	$\frac{80 \times 60}{10}$	10,60	$\frac{140 \times 100}{15}$	26,50
$\frac{85 \times 85}{11}$	13,00	$\frac{85 \times 85}{15}$	17,00	$\frac{90 \times 60}{10}$	11,20	$\frac{150 \times 70}{14}$	21,00
$\frac{90 \times 90}{11}$	14,00	$\frac{90 \times 90}{15}$	21,00	$\frac{90 \times 70}{9}$	10,50	$\frac{150 \times 90}{14}$	24,50
$\frac{100 \times 100}{12}$	17,00	$\frac{100 \times 100}{16}$	23,00	$\frac{95 \times 60}{7}$	9,20	$\frac{160 \times 90}{14}$	26,00
$\frac{120 \times 120}{13}$	23,00	$\frac{120 \times 120}{16}$	29,00	$\frac{100 \times 65}{13}$	16,00	$\frac{160 \times 120}{15}$	31,00

442. Fers plats. *Poids approximatifs en kilogrammes par mètre.*

ÉPAISSEUR en millimètr.	LARGEUR EN MILLIMÈTRES.																								
	27	29	32	34	36	38	40	45	47	50	54	61	65	68	75	81	90	95	100	108	135	160	200	220	250	300
	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil
9	1,89	2,00	2,24	2,38	2,52	2,76	2,80	3,15	3,29	3,50	3,78	4,20	4,55	4,68	5,25	5,58	6,30	6,65	7,00	7,44	9,45	11,15	14,00	15,40	17,50	21,00
11	2,31	2,44	2,74	2,91	3,08	3,25	3,42	3,85	4,02	4,28	4,62	5,13	5,50	5,72	6,42	6,82	7,70	7,99	8,56	9,08	11,56	13,60	17,10	18,80	21,40	25,68
14	2,94	3,11	3,48	3,70	3,92	4,14	4,36	4,90	5,12	5,45	5,88	6,53	7,03	7,28	8,17	8,67	9,81	10,35	10,90	11,56	14,71	17,30	21,80	23,90	27,25	32,70
16	3,36	3,55	3,98	4,23	4,48	4,73	4,98	5,60	5,85	6,23	6,71	7,47	8,10	8,32	9,34	9,90	11,20	11,83	12,46	13,22	16,81	19,78	24,92	27,30	31,15	37,38
18	3,78	3,99	4,48	4,76	5,04	5,32	5,60	6,30	6,58	7,00	7,56	8,40	9,11	9,36	10,50	11,15	12,60	13,31	14,01	14,88	18,91	22,30	28,02	30,70	35,00	42,03
20	4,20	4,44	4,98	5,29	5,60	5,91	6,23	6,98	7,31	7,78	8,39	9,33	10,12	10,40	11,68	12,39	14,01	14,79	15,57	16,52	21,02	24,72	31,14	34,10	38,90	46,71
23	4,83	5,11	5,73	6,07	6,44	6,81	7,16	8,05	8,27	8,95	9,64	10,74	11,62	11,96	13,44	14,25	16,11	16,72	17,91	19,00	24,17	28,45	35,82	39,20	44,75	53,73
25	5,25	5,55	6,24	6,60	7,00	7,39	7,78	8,75	9,15	9,73	10,48	11,67	12,64	13,00	14,60	15,49	17,51	18,49	19,47	20,66	26,27	30,95	38,94	42,60	48,65	58,41
27	5,67	6,00	6,75	7,13	7,56	7,98	8,40	9,45	9,75	10,52	11,35	12,60	13,66	14,04	15,76	16,73	18,91	19,45	21,02	22,30	28,38	33,40	42,04	46,00	52,60	63,06
29	6,09	6,45	7,25	7,66	8,12	8,57	9,02	10,14	10,51	11,30	12,18	13,53	14,62	15,08	16,94	17,97	20,31	21,45	22,59	23,96	30,49	35,88	45,18	49,40	56,50	68,77
32	6,72	7,12	8,00	8,44	8,96	9,47	9,98	11,19	11,46	12,46	13,43	14,94	16,18	16,12	18,70	19,83	22,41	23,67	24,92	26,42	33,64	39,60	49,84	54,50	62,30	74,76
34	7,14	7,56	8,49	8,98	9,52	10,06	10,60	11,89	12,22	13,24	14,27	15,87	17,20	17,68	19,85	21,07	23,81	25,15	26,47	28,08	35,74	42,10	52,94	57,90	66,20	79,41
36	7,56	8,00	8,98	9,52	10,08	10,65	11,22	12,58	13,00	14,00	15,14	16,80	18,21	18,72	21,02	22,31	25,21	26,63	28,03	29,74	37,84	44,55	56,06	61,30	70,00	84,09
38	7,98	8,44	9,47	10,05	10,64	11,24	11,84	13,30	13,78	14,78	15,98	17,73	19,22	19,76	22,18	23,55	26,61	28,11	29,59	31,38	39,95	47,00	59,18	64,70	73,90	88,77
40	8,40	8,89	9,96	10,58	11,20	11,83	12,46	14,00	14,58	15,56	16,80	18,66	20,24	20,80	23,36	24,78	28,01	29,58	31,14	33,04	42,04	49,45	62,28	68,10	77,80	93,42

443. Grandes tôles plates. *Poids approximatifs en kilogrammes par mètre.*

HAUTEUR en millimètr.	ÉPAISSEUR EN MILLIMÈTRES.									
	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.
180	8,1	9,8	11,2	12,6	14,0	15,4	16,8	18,2	19,6	21,0
190	8,9	10,4	11,8	13,3	14,8	16,3	17,8	19,2	20,7	22,2
200	9,3	10,9	12,4	14,0	15.6	17,1	18,7	20,2	21,8	23,4
210	9,8	11,4	13,1	14,7	16,3	18,0	19,6	21,2	22,9	24,5
220	10,3	12,0	13,7	15,4	17,1	18,8	20,6	22,3	24,0	25,7
230	10,7	12,5	14,3	16,1	17,9	19,7	21,5	23,3	25,1	26,9
240	11,2	13,1	15,0	16,8	18,7	20,6	22,4	24,3	26,2	28,0
250	11,7	13,6	15,6	17,5	19,5	21,4	23,4	25,3	27,3	29,2
260	12,1	14,2	16,2	18,2	20,2	22,2	24,3	26,3	28,3	30,4
270	12,6	14,7	16,8	18.9	21,0	23,1	25,2	27,3	29,4	31,5
280	13,0	15,3	17,4	19,6	21,8	24,0	26,2	28,3	30,5	32,7
290	13,6	15,8	18,1	20,3	22,6	24,8	27,1	29,4	31,6	33,9
300	14,0	16,3	18,7	21,0	23,4	25,7	28,0	30,4	32,7	35,0
310	14,1	16,9	19,3	21,7	24,1	26,5	29,0	31,4	33,8	36,2
320	14,9	17,4	20,0	22,4	24,9	27,4	29,9	32,4	34,9	37,4
330	15,4	18,0	20,6	23,1	25,7	28,3	30,9	33,4	36,0	38,5
340	15,9	18,5	21,2	23,8	26,5	29,1	31,8	34,4	37,1	39,7
350	16,3	19,1	21,8	24,5	27,3	30,0	32,7	35,4	38,2	40,9
370	17,3	20,2	23,0	25,9	28,8	31,7	34,6	37,4	40,3	43,2
400	18,7	21,2	24,3	27,3	30,3	33,4	36,4	39,4	42,5	45,5
450	21,0	24,5	28,0	31,5	35,0	38,5	42,1	45,6	49,1	52,6
470	22,0	25,6	29,3	33,0	36,6	40,3	44,0	47,6	51,3	55,0
500	23,4	27,2	31,1	35,0	38,9	42,8	46,7	50,6	54,5	58,4
550	25,7	30,0	34,2	38,5	42,8	47,1	51,4	55,7	60,0	64,3
600	28,0	32,7	37,4	42,1	46,7	51,4	56,1	60,7	65,4	70,1
650	30,4	35,4	40,5	45,6	50,6	55,7	60,8	65,8	70,8	76,0
700	32,7	38,2	43,6	49,1	54,5	60,0	65,4	70,9	76,3	81,8
750	35,0	40,9	46,7	52,6	58,4	64,3	70,1	75,9	81,8	87,6
800	37,3	43,6	49.8	56,0	62,2	68,5	74,7	80,9	87,1	93,4
850	39,7	46,3	52,9	59,5	66,1	72,8	79,4	86,0	95,6	99,3
900	42,0	49,1	56,1	63,1	70,1	77,1	84,1	91,1	98,1	105,1
950	44,4	51,8	59,2	66,6	74,0	81,4	88,8	96,2	103,6	111,0
1000	46,7	54,5	62,2	70,0	77,9	85,7	93,5	101,3	109,0	116,8

444. Cuivre. Les planches de cuivre jaune ont $0^m,66$ sur $1^m,132$, et celles de cuivre rouge $1^m,137$ sur $1^m,407$; le poids exprimé en livres donne le numéro des feuilles.

445. Tarif du zinc laminé *de la Vieille-Montagne.* (Voir p. 536.)

Les feuilles n°s 1 à 5 ne sont laminées que sur commande spéciale, à dimensions réduites et à prix débattu. Les feuilles n° 6 se vendent avec une plus-value de 5 francs par 100 kilog. sur le cours officiel des numéros du commerce (n°s 8 à 26), et le n° 7 avec une plus-value de 2 francs par 100 kilog.

Emplois de divers numéros de zinc.

N°s 1 à 9. Les feuilles s'emploient pour la perforation, pour les cribles, stores et tamis en zinc, et pour le satinage des papiers. Ils s'emploient encore pour la fabrication des petits objets en zinc, tels que miroirs, porte-mouchettes, éteignoirs, tabletteries, et tous autres objets légers désignés sous le nom d'*articles de Paris.*

Nos 10 et 11. Ces numéros sont très employés dans la fabrication des lampes, des lanternes et pour tout ce qui concerne la ferblanterie en général. Ces numéros s'estampent encore très facilement en ornements divers pour girouettes, clochetons, etc. Ils s'appliquent aussi le long des murs pour préserver les appartements de l'humidité, et dans les cabinets comme revêtements.

Nos 12 et 13. Le n° 12 sert à la fabrication des objets de ménage, tels que seaux, brocs, arrosoirs, bains de pieds, etc. Avec ces numéros se font aussi les descentes d'eau pour les petites constructions, les couvertures de hangars ou ateliers provisoires, des recouvrements de saillies, corniches, etc.

N° 14. Le n° 14 est spécial aux toitures; c'est celui qui doit être employé le plus généralement. Avec ce numéro, une couverture bien faite doit donner des résultats toujours satisfaisants, et durer au moins vingt-cinq à trente ans sans réparations. Des numéros au-dessous ne pourraient faire un service convenable.

Nos 15 et 16. Ces numéros en grandes dimensions sont employés pour couvertures de monuments, chéneaux, caisses d'eau, bains de siège et fonds de baignoires. En petites dimensions, $0^m,35$ à $0^m,40$ sur $1^m,15$ à $1^m,30$, ils servent pour doublage des navires aux endroits qui supportent le moins de fatigue.

N° 17. En grandes dimensions, ce numéro s'emploie pour les parois de baignoires, et en petites dimensions pour doublage à l'avant des navires, où le frottement de la lame exige du doublage une grande résistance; c'est même pour cela que l'on fait souvent usage des nos 18 à 20.

N° 18 à 25. On emploie ces épaisseurs pour les pompes, la garniture intérieure des cuves à papeteries, des réservoirs et cristallisoirs divers en usage dans les raffineries, etc.; ils offrent une résistance telle qu'une caisse ainsi doublée doit durer cinquante ou soixante ans.

NUMÉRO du zinc.	ÉPAISSEUR approximative.		POIDS MOYEN APPROXIMATIF D'UNE FEUILLE DES DIMENSIONS SUIVANTES : Pour toitures et autres emplois.			Pour doublages de navires.		POIDS moyen approxim. du mèt. carré (1)	
			$2^m,00 \times 0^m,80$ $=1^{mq},60$	$2^m,00 \times 0^m,65$ $=1^{mq},30$	$2^m,00 \times 0^m,50$ $=1^{mq},00$	$1^m,30 \times 0^m,40$ $=0^{mq},52$	$1^m,15 \times 0^m,35$ $=0^{mq},4020$		
	millim.		kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	
1	0,05	Progression $0^{mil},05$	»	»	»	»	»	0,350	Progression $0^k,350$
2	0,10		»	»	»	»	»	0,700	
3	0,15		»	»	»	»	»	1,050	
4	0,20		»	»	»	»	»	1,400	
5	0,25		»	»	»	»	»	1,750	
6	0,30		3,35	2,70	2,10	»	»	2,100	
7	0,35		3,90	3,15	2,45	»	»	2,450	
8	0,40		4,45	3,60	2,80	»	»	2,800	
9	0,45		5,00	4,10	3,15	»	»	3,150	
10	0,50		5,60	4,55	3,50	»	»	3,500	
11	0,58	Pr. $0^{mil},08$	6,50	5,25	4,05	»	»	4,060	Pr. $0^k,560$
12	0,66		7,40	6,00	4,60	»	»	4,620	
13	0,74		8,30	6,75	5,20	»	»	5,180	
14	0,82		9,20	7,45	5,75	3,00	2.30	5,740	
15	0,95	Pr. $0^{mil},13$	10,65	8,65	6,65	3,45	2,65	6,650	Pr. $0^k,910$
16	1,08		12,10	9,80	7,55	3,95	3,00	7,560	
17	1,21		13,55	11,00	8,45	4,40	3,40	8,470	
18	1,34		15,00	12,20	9,40	4,85	3,75	9,380	
19	1,47		16,45	13,35	10,30	5,35	4,15	10,290	
20	1,60		17,90	14,55	11,20	5,80	4,50	11,200	
21	1,78	Pr. $0^{mil},18$	19,90	16,20	12,45	6,45	5,00	12,460	Pr. $1^k,260$
22	1,96		21,90	17,80	13,70	7,15	5,50	13,720	
23	2,14		23,90	19,50	15,00	7,80	6,00	14,980	
24	2,32		26,00	21,10	16,25	8,45	6,55	16,240	
25	2,50		28,00	22,70	17,50	9,10	7,00	17,500	
26	2,68		30,00	24,40	18,75	9,75	7,55	18,760	

(1) Un mètre cube de zinc pèse 7000 kilog.; ainsi une feuille d'un mètre carré sur un millimètre d'épaisseur pèse 7 kilog. On doit admettre une tolérance de 25 décagrammes en moins dans le poids de chaque feuille.

DEUXIÈME PARTIE

PHYSIQUE INDUSTRIELLE

NOMENCLATURE, NOTATIONS ET ÉQUIVALENTS CHIMIQUES

446. Division des corps en trois règnes. Les corps, si variés et si nombreux de la nature, se divisent en trois grandes classes ou règnes : le *règne minéral*, le *règne végétal* et le *règne animal.*

Les *minéraux* sont formés d'une matière inerte, et sont par conséquent incapables de s'accroître spontanément.

Les *végétaux* vivent, se développent; mais ils sont dépourvus d'instinct ainsi que de motilité.

Les *animaux*, en outre qu'ils se développent à la manière des végétaux, possèdent la faculté de se mouvoir, et de plus, ils sont doués d'instinct, de volonté, d'intelligence.

Les végétaux et les animaux prennent le nom général de *corps organisés*, par opposition aux minéraux, que l'on appelle *corps inorganiques.*

447. Différents points de vue sous lesquels on peut étudier les corps. Les corps, quel que soit le règne auquel ils appartiennent, peuvent être étudiés sous trois points de vue distincts :

1° Sous le *point de vue descriptif*, en les prenant d'abord un à un pour en examiner les propriétés extérieures, telles que la couleur, la forme, la densité, la fusibilité, la volatilité, etc., s'ils appartiennent au règne minéral, ou bien leur structure, la forme et la disposition de leurs organes, s'ils font partie du règne végétal ou du règne animal; puis en les classant d'après leurs affinités, leurs ressemblances et suivant des caractères pris dans leur organisation intérieure et extérieure. L'étude des corps sous ce premier point de vue constitue l'*Histoire naturelle*, qui se divise : 1° en *Minéralogie* (histoire des minéraux); 2° *Botanique* (histoire des végétaux); 3° *Zoologie* (histoire des animaux). L'étude du mode de conformation des organes d'un animal ou d'un végétal constitue la branche de l'Histoire naturelle connue sous le nom d'*Anatomie.* L'étude des *fonctions* de ces êtres porte le nom de *Physiologie.* Ainsi l'Anatomie est la science qui traite de la structure des corps organisés, et la Physiologie est la science de la vie.

2° On étudie les corps d'après la nature et les proportions des élé-

ments qui les composent. Cette étude des propriétés intimes de la matière constitue la *Chimie*. Elle oblige de faire agir sur le corps qu'on étudie un autre corps qui modifie sa composition, ou des forces ou agents tels que la chaleur, l'électricité, la lumière, etc., qui modifient également sa composition, en donnant naissance à un nouveau corps connu qui fait connaître le premier.

3° Ces forces ou agents, indépendamment des effets chimiques, c'est-à-dire des changements de composition des corps, produisent d'autres phénomènes, qui ne dépendent pas des premiers, et qui se manifestent le plus souvent seuls. L'étude de ces phénomènes, ou mieux des causes, c'est-à-dire des forces ou agents qui les produisent, constitue la *Physique*.

En chauffant un prisme de fonte il se produit un premier effet, c'est celui de *dilatation;* en portant la température à un degré plus élevé, l'effet de *fusion* se produit. L'action de la chaleur cessant, la fonte se solidifie, et on peut même la mouler suivant sa forme primitive. Après le refroidissement complet, le prisme a repris ses dimensions premières, avec toutes ses autres propriétés; son poids et sa composition n'ont pas changé; le corps n'a subi que des effets physiques.

En chauffant un prisme de craie, le phénomène de dilatation se manifeste d'abord seul; mais en portant et maintenant la température à un degré plus élevé pendant un certain temps, puis laissant refroidir, quoique le prisme reprenne son aspect primitif, il est loin d'avoir conservé sa composition et ses propriétés primitives. Il a perdu son acide carbonique, en passant de l'état de carbonate de chaux à celui de chaux vive, qui a des propriétés bien différentes; son poids a diminué. Il s'est produit dans ce cas un effet chimique.

448. Corps simples. Corps composés. Métaux. Métalloïdes. Les corps se divisent en corps simples et en corps composés.

Les *corps simples* sont ceux qui, soumis à l'analyse, n'ont donné jusqu'à présent que des produits parfaitement homogènes, jouissant de toutes les propriétés du corps étudié, et uniquement de celles-là.

Les *corps composés* soumis à l'analyse se séparent en plusieurs autres corps composés ou simples, qui étaient unis entre eux d'une manière intime, et qui maintenant jouissent chacun de propriétés distinctes.

Les corps simples se divisent en *métaux*, dont les caractères sont familiers à tout le monde (qui conduisent bien l'électricité et la chaleur) et en *métalloïdes*, qui sont dépourvus des propriétés physiques des métaux. On distingue 15 métalloïdes et 61 métaux, en comprenant les nouveaux métaux découverts dans ces dernières années, au moyen de l'analyse spectrale, ce qui fait en tout 76 corps simples :

Tableau des corps simples et de leurs symboles.

Métalloïdes.

Arsenic	As	Carbone	C	Iode	Io	Silicium	Si
Azote	Az	Chlore	Cl	Oxygène	O	Soufre	S
Bore	Bo	Fluor	Fl	Phosphore	Ph	Tellure	Te
Brome	Br	Hydrogène	H	Sélénium	Se		

Métaux.

Aluminium	Al	Fer	Fe	Niobium	Nb	Tantale	Ta
Antimoine	Sb	Gallium	Ga	Or	Au	Terbium	Tb
Argent	Ag	Galodinium	Gd	Osmium	Os	Thallium	Tl
Baryum	Ba	Germanium	Ge	Palladium	Pd	Thorium	Th
Bismuth	Bi	Glucinium	Gl	Pelopium	Pp	Thulium	Tu
Cadmium	Cd	Holmium	Ho	Platine	Pt	Titane	Ti
Calcium	Ca	Indium	In	Plomb	Pb	Tungstène	Tu ou W
Cérium	Ce	Iridium	Ir	Potassium	K	Uranium	Ur
Chrome	Cr	Lanthane	La	Praséodynium	Pr	Vanadium	Va
Cobalt	Co	Lithium	Li	Rhodium	Rh	Ytterbium	Yb
Cœsium	Cs	Magnésium	Mg	Rubidium	Rb	Yttrium	Yt
Cuivre	Cu	Manganèse	Mn	Ruthénium	Ru	Zinc	Zn
Décipium	Dé	Mercure	Hg	Samarium	Sm	Zirconium	Zr
Didyme	Di	Molybdène	Mo	Scandium	Sc		
Erbium	Er	Néodymium	Ne	Sodium	Na		
Étain	Sn	Nickel	Ni	Strontium	St		

449. Force d'affinité. Force dissolvante. Mélange. Réaction chimique. Les corps simples s'unissent entre eux pour former des corps composés, dont le nombre est pour ainsi dire illimité. La cause en vertu de laquelle les particules des corps s'unissent pour donner naissance à des corps nouveaux est appelée *affinité*. C'est une force attractive d'une espèce particulière, dont l'intensité varie avec les corps, et qui est toute différente de la *gravitation moléculaire* (*Int.* 1534).

En mettant un morceau de sucre dans un verre d'eau, ses molécules se séparent pour s'interposer entre les molécules de l'eau; mais ni l'eau ni le sucre ne perdent leurs propriétés primitives, l'eau conserve sa liquidité et sa limpidité, et le sucre sa saveur. Cet effet est produit par une *force dissolvante*, qui diffère de l'affinité chimique, puisqu'il n'en résulte qu'une *dissolution*, c'est-à-dire un simple *mélange* des corps, au lieu que de la combinaison produite par l'affinité résulte un corps jouissant de propriétés nouvelles qui lui sont propres; c'est un corps nouveau produit par une *réaction chimique* (451).

450. Acides. Alcalis ou bases. Sels. Des corps en s'unissant avec l'oxygène ou l'hydrogène, mais surtout avec le premier de ces corps, peuvent former des *acides*, composés qui, comme le vinaigre, ont une saveur aigre et rougissent la teinture bleue de tournesol. D'autres corps, par leur union avec l'oxygène, peuvent former des *alcalis* ou *bases*, composés qui ont une saveur caustique et urineuse, et qui sont susceptibles de ramener au bleu la teinture de tournesol rougie par un acide. La combinaison d'un acide et d'une base prend le nom de *sel*.

On nomme *oxydes neutres* ou simplement *oxydes*, les composés binaires oxygénés qui ne présentent ni les propriétés des bases ni celles des acides.

451. L'expérience prouve que deux corps simples ou composés, mis en présence, se combinent chimiquement avec d'autant plus d'énergie (449), le composé est d'autant plus intime et plus durable, que les

deux corps diffèrent davantage par leurs propriétés. Ainsi l'acide sulfurique, qui rougit avec rapidité la teinture de tournesol, et la soude, qui possède à un haut degré la propriété contraire (base), se combinent avec énergie en donnant un sel fixe qui n'a plus les propriétés distinctives des acides ni celles des alcalis. De plus, l'acide sulfurique et la soude introduits isolément dans l'économie ne tardent pas à donner la mort, au lieu que le *sulfate de soude* qui résulte de leur réunion peut sans inconvénient être pris en assez grande quantité; il est même employé en médecine, sous le nom de *sel de Glauber*, à cause de ses propriétés purgatives.

Le chlore et le sodium, corps simples tous deux, mais doués des propriétés les plus opposées, se combinent chimiquement avec énergie, pour engendrer un produit fort stable, le sel de cuisine, dans lequel les propriétés des principes constituants ont complètement disparu.

Un fait important par sa généralité consiste en ce que toutes les fois que deux corps se combinent en vertu d'affinités énergiques, ils ne s'unissent jamais qu'en un petit nombre de proportions, et les composés qui en résultent jouissent d'une très grande stabilité. Si au contraire les affinités sont trop faibles, les combinaisons peuvent être nombreuses et toujours très peu stables.

Si deux corps ont d'autant plus d'affinité pour se combiner chimiquement qu'ils diffèrent davantage, au contraire, pour dissoudre un solide dans un liquide, les deux corps doivent avoir le plus de ressemblance possible. Ainsi l'eau, qui est très riche en oxygène, dissout facilement les substances très oxygénées, tandis qu'elle n'exerce aucune action sur les corps gras et résineux, qui sont très pauvres en oxygène et riches en carbone et hydrogène. Les corps gras et résineux, au contraire, se dissolvent très facilement dans l'alcool, l'éther, les huiles grasses et volatiles, liquides qui contiennent eux-mêmes une forte proportion d'hydrogène et de carbone. De même, le mercure, métal liquide, dissout avec facilité la plupart des autres métaux.

452. On donne le nom de *cohésion* à la force qui réunit entre elles les particules d'un même corps. C'est la résultante de l'attraction ou gravitation moléculaire et de la force répulsive produite par l'atmosphère impondérable qui sépare chaque molécule d'un même corps de ses voisines. Elle est plus ou moins grande dans les solides; on la considère comme nulle dans les liquides, et sa valeur est négative dans les gaz (*Int.* 1534).

453. Limite de la divisibilité de la matière. Atome. Molécule. Particule. Les corps simples ne se combinent pas chimiquement entre eux dans toutes les proportions pour donner naissance aux corps composés; le nombre des proportions étant, au contraire, souvent réduit à un et ne s'élevant jamais qu'à un chiffre très peu élevé, on en déduit que la matière n'est pas divisible à l'infini.

La quantité aussi petite que possible d'un corps simple nécessaire pour former un corps composé par sa combinaison chimique avec un

ou plusieurs autres corps, peut être considérée comme étant indivisible, et on lui donne le nom d'*atome*.

La réunion des atomes nécessaires pour constituer la portion aussi petite que possible d'un corps composé prend le nom de *molécule*. Dans un corps simple, la molécule ne se compose que d'un atome; dans l'acide sulfurique, SO^3, elle se compose d'un atome de soufre et de trois atomes d'oxygène, et une molécule de sulfate de baryte, SO^3, BaO, se compose d'une molécule d'acide sulfurique et d'une molécule de baryte, ou en atomes, de 1 de soufre, 1 de baryum et 4 d'oxygène.

On donne quelquefois aux molécules le nom de *particules*, nom sous lequel il convient de désigner les parties très petites d'un corps, mais pouvant cependant se composer d'un certain nombre de molécules.

454. Équivalents chimiques. Toutes les fois qu'un corps prend naissance, il se forme toujours des mêmes éléments unis dans les mêmes proportions, et *le poids du composé est égal à la somme des poids des éléments constituants*. Ainsi l'eau se compose toujours d'oxygène et d'hydrogène dans la proportion de 8 d'oxygène en poids pour 1 d'hydrogène, et 8 grammes d'oxygène et 1 gramme d'hydrogène donnent 9 grammes d'eau par leur combinaison. De même, 36,5 parties en poids de gaz chlorhydrique neutralisent toujours 17 parties de gaz ammoniac, en donnant naissance à 53,5 de chlorhydrate d'ammoniaque.

8 grammes d'oxygène combinés avec 108 grammes d'argent donnent 116 grammes de protoxyde d'argent, lesquels se combinent avec 54 grammes d'acide azotique pour donner 170 grammes d'azotate d'argent. Si dans la dissolution de ces 170 grammes de sel on plonge une lame de cuivre, les 108 grammes d'argent ne tardent pas à se déposer, et ils sont remplacés par $31^g,75$ de cuivre, qui se sont combinés avec les 54 grammes d'acide azotique. Comme pendant la réaction il ne s'est produit aucun dégagement d'oxygène, et que la dissolution, neutre d'abord, est restée neutre après la précipitation de l'argent, les $31^g,75$ de cuivre sont l'*équivalent* des 108 grammes d'argent. Si au lieu de prendre de l'azotate on prend un autre sel, du sulfate par exemple, on obtient des résultats identiques. Si dans la dissolution d'azotate de cuivre on plonge maintenant une lame de fer, les $31^g,75$ de cuivre sont remplacés par 28 grammes de fer. Si au lieu de fer on emploie du zinc, les $31^g,75$ de cuivre sont précipités par la dissolution de $32^g,75$ de zinc. En décomposant de la même manière un sel de plomb par une lame de zinc, on trouve qu'il faut employer $32^g,75$ de zinc pour opérer le dépôt de 104 grammes de plomb.

Il résulte donc que 108, 31,75 28, 32,75 et 104 sont des quantités équivalentes d'argent, de cuivre, de fer, de zinc et de plomb, pouvant se déplacer et se remplacer mutuellement, et susceptibles de se combiner chacune avec une même quantité d'oxygène représentée par 8.

Mettant du zinc métallique en présence de l'acide sulfurique hydraté le plus concentré possible, on remarque que 32,75 parties de zinc déplacent 1 partie d'hydrogène, qui provient de la décomposition de l'eau et qui se dégage. La quantité 1 d'hydrogène, qui était du reste unie à

8 d'oxygène, est donc aussi équivalente à celles précédentes d'argent, de cuivre, etc.

L'expérience apprend également que 16 de soufre, 36,5 de chlore, 80 de brome, etc., se combinent avec 31,75 de cuivre, 32,75 de zinc, 104 de plomb, etc.

Tous ces nombres sont les *équivalents chimiques* des corps auxquels ils se rapportent, en prenant l'équivalent de l'hydrogène pour unité. Mais on conçoit qu'on puisse prendre un nombre quelconque pour l'équivalent d'un corps, et faire varier proportionnellement les équivalents de tous les autres corps. Ainsi, prenant 100 pour l'équivalent de l'oxygène, au lieu de 8, en multipliant par $\frac{100}{8} = 12,5$ les équivalents rapportés à celui de l'hydrogène pris égal à 1, on a les équivalents rapportés à celui de l'oxygène pris égal à 100. L'équivalent de l'hydrogène devient ainsi $1 \times 12,5 = 12,5$ et celui du cuivre, $31,75 \times \frac{100}{8} = \frac{3175}{8} = 396,87$. Ayant l'équivalent d'un corps par rapport à l'oxygène, pour l'avoir par rapport à l'hydrogène, il suffit de le multiplier par 0,08.

Les chimistes, accordant une importance exclusive à l'oxygène, rapportèrent dès l'abord les équivalents des différents corps à cette substance, dont ils représentèrent l'équivalent par 100. Mais comme en les rapportant à l'équivalent représenté par 1 de l'hydrogène, ils sont exprimés par des nombres plus petits, souvent entiers, et qui, par suite, conduisent à des calculs plus simples, c'est ce qu'on fait de préférence aujourd'hui. Le tableau du n° 460 contient les équivalents chimiques des principaux corps dans les deux hypothèses précédentes.

455. **Équivalents chimiques des bases, des acides et des sels.** Donnons, pour fixer les idées, la composition de quelques sels neutres, en adoptant pour quantités les équivalents de ces sels, et ceux des bases et des acides qui entrent dans leur composition.

130,5	azotate de baryte	= 76,5	baryte	+ 54	acide azotique,
116,5	sulfate de baryte	= 76,5	baryte	+ 40	acide sulfurique,
87,0	sulfate de potasse	= 47,0	potasse	+ 40	*id.*
71,0	sulfate de soude	= 31,0	soude	+ 40	*id.*
68,0	sulfate de chaux	= 28,0	chaux	+ 40	*id.*

L'azotate neutre de baryte étant composé, pour 130,5 parties, de 76,5 de baryte et de 54 d'acide azotique, si on le traite par l'acide sulfurique, on obtient du sulfate neutre de baryte dans lequel 40 parties d'acide sulfurique ont remplacé exactement les 54 parties d'acide azotique. Alors la baryte étant prise pour commune mesure, les nombres 40 et 54 sont les équivalents des acides sulfurique et azotique. Les 40 parties, d'acide sulfurique donnant des sels neutres avec 47 parties de potasse, 31 de soude, 28 de chaux, comme avec les 76,5 de baryte, les nombres 47, 31, 28 et 76,5 sont les équivalents respectifs de ces bases. De plus, de même que 47 parties de potasse, 31 de soude, 28 de chaux neutra-

lisent 40 d'acide sulfurique, elles neutralisent l'équivalent 54 d'acide azotique. Enfin les quantités 130,5 d'azotate de baryte, 116,5 de sulfate de chaux, provenant de la combinaison d'un équivalent d'acide avec un équivalent de base, sont les équivalents des sels neutres auxquels elles se rapportent.

En généralisant, on voit que des quantités A, A', A''... de divers acides, qui neutralisent une même quantité B d'une base, neutralisent la même quantité B' ou B''... d'une autre base quelconque, et que de même des quantités, B, B', B''... de diverses bases, qui neutralisent une certaine quantité A d'un acide, neutralisent une même quantité A', ou A''... d'un acide quelconque. De plus, les quantités A, A', A''... d'acides, celles B, B', B''.... de bases, et celles $A + B$, $A' + B'$, $A'' + B''$... de sels neutres qui proviennent de la combinaison des premières, sont les équivalents des acides, des bases et des sels auxquels elles se rapportent.

De même que l'équivalent d'un sel est la somme de l'équivalent de l'acide, plus celui de la base, l'équivalent d'un acide, d'une base et en général d'un corps composé quelconque doit être la somme des équivalents des corps simples qui le constituent. Pour établir cette harmonie, l'oxygène entrant dans le plus grand nombre des combinaisons chimiques, on a adopté 100 pour son équivalent, et d'après la composition des autres corps on en a déduit leurs équivalents proportionnels.

Comme nous l'avons déjà dit (454), on prend souvent 8 pour l'équivalent de l'oxygène (l'hydrogène étant égal à 1). Dans cette hypothèse, le protoxyde d'argent, par exemple, étant composé de 108 d'argent pour 8 d'oxygène, 108 est l'équivalent de l'argent, et $108 + 8 = 116$ est celui du protoxyde d'argent.

456. Loi des proportions multiples. Comme il existe des corps, simples ou composés, qui peuvent s'unir chimiquement dans plusieurs proportions, ainsi, par exemple :

1	d'hydrogène	+ 8	d'oxygène	= 9	d'eau,
1	*id.*	+ 16	*id.*	= 17	d'eau oxygénée,

et

14	d'azote	+ 8	d'oxygène	= 22	de protoxyde d'azote,
14	*id*	+ 16	*id.*	= 30	de bioxyde d'azote,
14	*id.*	+ 24	*id.*	= 38	d'acide azoteux,
14	*id.*	+ 32	*id.*	= 46	d'acide hypoazotique,
14	*id.*	+ 40	*id.*	= 54	d'acide azotique,
14	*id.*	+ 48	*id.*	= 62	d'acide perazotique,

on est convenu de prendre pour l'équivalent d'un tel corps la quantité de ce corps réunie à 8 d'oxygène dans la combinaison la moins oxygénée. Ainsi l'on prend 1 pour l'équivalent de l'hydrogène, et 14 pour celui de l'azote. L'équivalent de l'acide azotique (AzO^5) est alors $14 + 8 \times 5 = 54$, et celui de l'azotate d'argent (AzO^5, AgO), est $54 + 116 = 170$.

Les combinaisons précédentes, de l'hydrogène et de l'azote avec l'oxygène, montrent que les quantités d'un même corps qui se com-

binent chimiquement avec une même quantité d'un autre corps sont entre elles dans des rapports très simples. D'où résulte la *loi des proportions multiples*, découverte par Dalton. Ces rapports sont ceux des nombres entiers successifs 1, 2, 3, 4, 5 dans les exemples précédents; mais ils sont généralement ceux des nombres 1, 3/2, 2, 5/2, 3, 7/2..., un ou plusieurs de ces nombres pouvant manquer. Pour l'oxygène et le manganèse, par exemple, 27,5 de manganèse se combinent avec 8, 12, 16, 24 et 28 d'oxygène, quantités qui sont entre elles comme les nombres 1, 3/2, 2, 3 et 7/2.

La loi des proportions multiples s'applique également aux corps composés qui se combinent chimiquement en plusieurs proportions. Ainsi, par exemple, 31 de soude se combinent avec 22, 33 et 44 d'acide carbonique, et ces quantiés sont entre elles comme les nombres 1, 3/2 et 2.

457. **Nomenclature chimique.** 1° *Combinaisons binaires non oxygénées.* Un tel corps soumis à un courant suffisamment puissant de la pile électrique se décompose, et l'un des éléments va au pôle positif et l'autre au pôle négatif; d'où le nom d'*électro-négatif* donné au premier élément, et celui d'*électro-positif* donné au second (618).

Les métalloïdes peuvent être considérés comme électro-négatifs par rapport aux métaux. Un même corps peut jouer le rôle d'électro-négatif par rapport à un corps, et celui d'électro-positif par rapport à un autre. Tel est le phosphore, qui est électro-négatif par rapport au fer et électro-positif par rapport au chlore.

Un composé binaire non oxygéné se désigne par les noms des deux corps composants, en plaçant celui qui joue le rôle d'électro-négatif le premier; mais au lieu de dire, par exemple, chlore de plomb, on dit *chlorure de plomb*, en remplaçant le mot chlore par son radical suivi de *ure*. Pour le soufre, on prend le radical du mot latin *sulfurum*; ainsi l'on dit *sulfure de fer*, *carbure de fer*, *séléniure de cuivre*, *phosphure de fer*, *chlorure de phosphore*.

Lorsque deux corps s'unissent en plusieurs proportions, on fait précéder les noms composés précédents de *proto*, *sesqui*, *bi*, *tri*, *quadri*, *quinti*, etc., selon que les quantités du premier corps entrant dans le composé sont entre elles dans le rapport des nombres 1, 3/2, 2, 3, 4, 5, etc. Une même quantité de soufre se combinant avec deux quantités de chlore qui sont entre elles dans le rapport de 1 à 2, on a le *protochlorure de soufre* (S^2Cl) et le *bichlorure de soufre* (SCl). Dans les deux chlorures de fer, les quantités de chlore étant entre elles comme les nombres 1 et 3/2, le premier est du *protochlorure de fer* ($FeCl$), et le second du *sesquichlorure de fer* (Fe^2Cl^3). Dans les *proto*, *bi*, *tri*, *quadri* et *quinti sulfures de potassium* (KS, KS^2, KS^3, KS^4 et KS^5), les quantités de soufre sont entre elles comme les nombres 1, 2, 3, 4 et 5.

Exceptions aux règles précédentes. 1re. Les combinaisons des métaux entre eux prennent le nom commun d'*alliages*, dont les plus importants ont conservé les noms sous lesquels ils sont connus depuis longtemps dans les arts (462). Ainsi l'alliage de cuivre et d'étain est appelé *bronze*, et

celui de cuivre et de zinc *laiton*. Les *amalgames* sont des alliages qui contiennent du mercure.

2me. Les composés gazeux résultant de la combinaison de l'hydrogène avec les métalloïdes, tels que le *phosphure*, l'*arséniure*, etc., *d'hydrogène*, sont quelquefois appelés *hydrogène phosphoré, hydrogène arsénié*, etc.

3me. L'azoture d'hydrogène est appelé *ammoniaque*, et l'azoture de carbone *cyanogène*.

4me. Les métalloïdes suivants : le chlore, le soufre, le brome, l'iode, le sélénium et le tellure forment, avec l'hydrogène, des gaz acides appelés *acide chlorhydrique*, *acide sulfhydrique*, etc.

2° *Composés binaires oxygénés*. Ces composés, qui devraient s'appeler *oxures* d'après la règle générale, se désignent sous le nom d'*oxydes* quand ils sont *basiques* ou *neutres*. Tels sont l'*oxyde de plomb*, l'*oxyde d'azote*, etc. L'usage a conservé à quelques oxydes métalliques les noms sous lesquels ils étaient désignés avant que leur composition fût connue. C'est ainsi qu'on dit de la *potasse*, de la *soude*, de la *chaux*, de l'*alumine*, etc. Il en est de même de l'*eau*, qui est du protoxyde d'hydrogène.

Si un même corps forme avec l'oxygène plusieurs composés neutres ou basiques, on les distingue entre eux comme pour les composés binaires ordinaires du 1°, à l'aide des préfixes *proto, sesqui, bi*. On a ainsi les *protoxyde*, *sesquioxyde* et *bioxyde* de manganèse (MnO, Mn^2O^3 et MnO^2); les *protoxyde* et *bioxyde* d'azote (AzO et AzO^2), etc.

Les *composés oxyénés acides* prennent le nom générique d'*acides*. Si le corps ne forme qu'un acide avec l'oxygène, on indique la nature de cet acide à l'aide d'un mot formé d'une abréviation du nom du corps et de la terminaison *ique* : *acide carbonique*, *acide ferrique*, etc. Si l'on connaît deux composés acides formés par le même corps avec l'oxygène, on conserve la terminaison *ique* pour l'acide le plus oxygéné, et l'on emploie celle *eux* pour le moins riche en oxygène : *acide sélénieux* (SeO^2), *acide sélénique* (SeO^3).

Comme, depuis Lavoisier, on a reconnu qu'un même corps pouvait former plus de deux combinaisons avec l'oxygène, on est convenu de faire précéder de *hypo* le nom de l'acide moins riche en oxygène que celui en *eux*, ainsi que celui de l'acide qui est intermédiaire entre celui en *eux* et celui en *ique*, et de distinguer un acide plus riche en oxygène que celui en *ique* en faisant précéder son nom de la préfixe *per* ou *hyper*. On a ainsi le moyen de désigner cinq acides formés par un même corps avec l'oxygène; ce qui a été suffisant jusqu'à présent, mais ce qui est nécessaire pour le chlore, qui donne en effet les acides *hypochloreux*, *chloreux*, *hypochlorique*, *chlorique* et *perchlorique* ou *hyperchlorique* (ClO, ClO^3, ClO^4, ClO^5, ClO^7).

Quelquefois cependant, quoiqu'un corps ne donne que deux acides, l'un est en *ique*, et l'autre, plus oxygéné, se spécifie par la préfixe *per* ou *hyper*. Ainsi le chrome fournit l'acide *chromique* CrO^3, et l'acide *perchromique* Cr^2O^7.

3° *Nomenclature des sels* (450). L'acide se rendant au pôle positif quand on décompose un sel à l'aide de la pile, il détermine le genre du sel, et l'oxyde l'espèce. Le genre se forme en remplaçant respectivement la terminaison *eux* ou celle *ique* de l'acide par la terminaison *ite* ou par celle *ate*, et l'espèce se détermine par le nom de l'oxyde. On dit ainsi *arsénite de protoxyde de cuivre* (AsO^3, $2CuO$), *hyposulfite de soude* (S^2O^2, NaO), *sulfate de protoxyde de fer* (SO^3, FeO), *azotate de sesquioxyde de fer* (AzO^5, Fe^2O^3).

Comme un acide et une base peuvent souvent se combiner en plusieurs proportions, et qu'en général si un composé est neutre, les autres sont acides ou basiques selon que la proportion d'acide est plus grande ou plus petite, le rapport entre la composition d'un sel donné et celle du sel neutre s'indique par les préfixes *sesqui*, *bi*, etc. On a ainsi les :

Carbonate neutre de soude	CO^2, NaO,
Sesquicarbonate de soude	$3CO^2$, $2NaO$,
Bicarbonate de soude	$2CO^2$, NaO.

Les préfixes *sesqui* et *bi* s'appliquant à l'acide, il est inutile d'indiquer autrement qu'il s'agit des sels acides.

Pour les azotates d'oxyde de mercure, on dit :

Azotate neutre d'oxyde	de mercure	AzO^5, HgO,
Azotate bibasique	—	AzO^5, $2HgO$,
Azotate tribasique	—	AzO^5, $3HgO$.

Quand un métal ne forme qu'un oxyde salifiable, ou au plus qu'un oxyde intéressant à étudier, pour abréger le discours, on supprime le mot *oxyde* dans le nom du sel. Ainsi l'on dit : *azotate neutre de mercure*, *azotate tribasique de mercure*, le mot *oxyde* étant sous-entendu.

Sels doubles. Certains sels se combinent entre eux en proportions définies; en général, ils ont le même acide; on les désigne alors en faisant suivre le nom générique du sel des noms de deux bases. Ainsi le sulfate double d'alumine et de potasse (l'*alun de potasse*) est une combinaison de sulfate d'alumine et de sulfate de potasse.

4° *Hydrates.* On désigne ainsi les combinaisons de l'eau avec les oxydes et les acides. Comme l'eau joue le rôle d'élément électro-positif par rapport aux acides, et le rôle d'électro-négatif par rapport aux bases, il convient, pour rester fidèle à la convention relative à l'ordre des noms, de dire, par exemple : *acide borique hydraté*, et, au contraire, *hydrate d'oxyde de cuivre, hydrate de potasse.*

5° *Composés de la chimie organique.* Les conventions ordinaires sont insuffisantes pour dénommer ces composés, qui sont en nombre immense, quoique la pluralité soient formés de la combinaison deux à deux, trois à trois, quatre à quatre, d'un très petit nombre d'éléments, tels que le carbone, l'hydrogène, l'oxygène et l'azote. On n'a établi aucune règle pour leur nomenclature. On les a seulement divisés en trois grandes classes, les *composés acides*, les *composés alcalins* et les *composés neutres*, et l'on a cherché à spécifier chaque corps par un nom rappelant son origine et ses propriétés. Tels sont : l'*acide citrique*, trouvé

dans le citron; le *sucre*, retiré du jus sucré de beaucoup de plantes; la *quinine*, base extraite du quinquina.

Les chimistes modernes, en s'occupant surtout de la classification des corps organiques en série, ont cependant imaginé des nomenclatures partielles qui facilitent beaucoup l'étude de la chimie organique.

458. **Notation chimique.** Nous avons donné (448) les symboles à l'aide desquels on représente les corps simples. Pour la notation chimique des composés, deux théories sont en présence : la théorie ancienne équivalentiste ou dualistique et la théorie atomique ou unitaire, dont l'usage s'est répandu en France, grâce aux enseignements de Wurtz.

Notation équivalentiste. Un composé binaire se représente par la réunion des symboles des deux corps simples composants; ainsi le *sulfure de plomb* s'écrit PbS. Le nombre des équivalents de chaque corps simple entrant dans un composé binaire s'indique par un exposant mis à la droite du symbole du corps simple, en se dispensant d'écrire l'exposant 1. Ainsi l'acide sulfurique, composé de 3 équivalents d'oxygène et de 1 de soufre, s'écrit SO^3. La combinaison de deux composés binaires se représente en écrivant leurs formules l'une à la suite de l'autre et en les séparant par une virgule; le sulfate de potasse a ainsi pour formule SO^3, KO. Si l'un des composés binaires entre dans la combinaison en plusieurs équivalents, on l'indique par un coefficient placé à sa gauche; le sulfate d'alumine, composé de 3 équivalents d'acide sulfurique pour 1 d'alumine, a pour formule $3SO^3, Al^2O^3$. De même, $2(SO^3, FeO)$ indique que 2 équivalents de sulfate de protoxyde de fer entrent dans la combinaison où il figure. Enfin, si un corps est formé de la combinaison de plusieurs des composés précédents, sa formule exprime la somme des formules des composants. Par exemple, l'alun ordinaire a pour formule:

$$SO^3, KO + 3SO^3, Al^2O^3 + 24HO,$$

qui indique que l'équivalent de l'alun se compose de 1 équivalent de sulfate de potasse, de 1 équivalent de sulfate d'alumine, et de 24 équivalents d'eau.

Notation atomique. Elle diffère de la précédente par la valeur des symboles et par le mode de groupement de ces symboles.

Ainsi, voici les formules comparées de quelques corps :

	Formule atomique.	Formule équivalentiste.
Eau	H^2O	HO
Acide carbonique	CO^2	CO^2 ou C^2O^4
Cyanogène.	CAz	C^2Az
Gaz ammoniac.	AzH^3	AzH^3

Pour deux H, il y a deux O dans l'ancienne formule de l'eau et un seul O dans la nouvelle; pour un Az, il y a deux C dans l'ancienne formule du cyanogène et un seul C dans la nouvelle, etc. C'est que H représente, dans les deux cas, 1 gramme d'hydrogène, tandis que O représente 8 grammes d'oxygène dans la notation équivalentiste et 16 grammes dans

la notation atomique; de même C, qui représentait 6 grammes, en représente 12.

Voici l'explication de cette différence :

D'après la loi de Gay-Lussac, il existe un rapport simple entre la somme des volumes des gaz qui entrent en combinaison, et le volume qu'occupe la combinaison prise à l'état gazeux. C'est ainsi que 2 volumes d'hydrogène combinés avec 1 volume d'oxygène, donnent 2 volumes d'eau, à l'état gazeux.

« Si l'on peut admettre avec Dalton, dit Wurtz, que les proportions définies suivant lesquelles les corps se combinent représentent le poids de leurs *atomes*, s'il est constant, d'après Gay-Lussac, que les volumes suivant lesquels les gaz s'unissent sont entre eux dans des rapports simples et invariables, il est clair que les poids relatifs de ces volumes, c'est-à-dire les densités, doivent représenter les poids relatifs des *atomes*. Il en résulte que, pour trouver les poids relatifs des atomes des gaz simples, il suffit de déterminer et de comparer leurs densités. »

Pour l'eau, comme l'hydrogène se combine avec l'oxygène dans le rapport de 2 volumes à 1 volume, si l'on admet que les *poids atomiques* sont proportionnels aux densités, il faut admettre aussi que la combinaison s'accomplit dans le rapport de 2 *atomes à* 1 *atome*. En effet, les densités de l'hydrogène et de l'oxygène sont entre elles : : 1 : 16 et non pas : : 1 : 8 (équivalents en poids), et comme les deux corps se combinent dans le rapport de 1 : 8, il en résulte que l'eau est formée de 2 atomes d'hydrogène et de 1 atome d'oxygène.

La formule du gaz ammoniac se trouve être la même dans les deux notations, parce que le poids atomique et l'équivalent se trouvent égaux pour l'hydrogène et pour l'azote. La formule de l'acide carbonique est aussi la même dans les deux cas, parce que le poids atomique est le double de l'équivalent pour le carbone comme pour l'oxygène, en sorte que le rapport des valeurs des symboles n'a pas changé.

458 *bis*. *Règle pour transformer une formule équivalentiste en formule atomique :* 1° prendre la moitié de tous les indices des corps simples dont le poids atomique est double de l'équivalent (car le poids atomique est pour les corps usuels *égal* ou *double* de l'équivalent; pour quelques corps rares, il est triple ou quadruple); 2° doubler ensuite tous les indices, s'il s'en trouve de fractionnaires.

Inversement, pour transformer une formule atomique en formule équivalentiste, il faut: 1° conserver les indices de tous les symboles de corps simples dont le poids atomique est égal à l'équivalent; 2° doubler les indices des corps simples dont l'équivalent est la moitié du poids atomique. Si l'on est conduit à doubler les indices de tous les symboles, on peut s'en dispenser, puisque les rapports ne changent pas.

Dans le tableau suivant, les corps dont le poids atomique est quadruple de l'équivalent sont précédés d'un 4; ceux dont le poids atomique est triple de l'équivalent sont précédés d'un 3; quand il est double, ils sont précédés d'un 2; les autres ont leur poids atomique égal à leur équivalent.

459. Poids atomiques des principaux corps simples, d'après M. Van der Plaats. (*Annales de chimie et de physique*, 1886.)

CORPS simples.	SYMBOLES.	POIDS atomique.	INCERTITUDE.	CORPS simples.	SYMBOLES.	POIDS atomique.	INCERTITUDE.
Argent. . .	Ag	107,93	0,01	2 Molybdène.	Mo	96	0,3
2 Aluminium	Al	27,08	0,05	Sodium. . .	Na	23,05	0,005
Arsenic. . .	As	75	0,3	2 Niobium. .	Nb	94	2
2 Or..	Au	196,7	0,5	2 Nickel . . .	Ni	58 ou 58,8	0,5
Azote. . . .	Az	14,05	0,01	2 Oxygène . .	O	16	*base*
2 Baryum. . .	Ba	137,1	0,1	2 Osmium . .	Os	195	5
Bismuth . .	Bi	208	0,3	Phosphore.	Ph	30,95	0,05
Bore. . . .	Bo	11	0,1	2 Plomb . . .	Pb	206,91	0,05
Brome . . .	Br	79,955	0,1	2 Palladium .	Pd	106,5	1
2 Carbone . .	C	12,005	0,005	2 Platine. . .	Pt	194,9	0,2
2 Calcium . .	Ca	40	0,05	Rubidium..	Rb	85,4	0,1
2 Cadmium. .	Cd	112,1	0,2	2 Rhodium. .	Rh	104	1
3 Cérium. . .	Ce	141,5	1	2 Ruthénium.	Ru	104	1
Chlore . . .	Cl	35,456	0,005	2 Soufre . . .	S	32,06	0,01
2 Cobalt . . .	Co	58,8 ou 60	0,5	Antimoine .	Sb	120	0,2
2 Chrome. . .	Cr	52,3	0,3	Scandium. .	Sc	44	0,5
Cæsium.. .	Cs	132,8	0,3	2 Sélénium. .	Se	79	0,2
2 Cuivre . . .	Cu	63,33	0,02	2 Silicium . .	Si	28	0,1
3 Didyme. . .	Di	145	3	3 Samarium .	Sm	150	0,5
3 Erbium. . .	Er	166	2	2 Etain. . . .	Sn	118,1	0,1
Fluor. . . .	Fl	19	0,1	2 Strontium .	Sr	87,5	0,1
2 Fer.	Fe	56	0,05	3 Tantale. . .	Ta	182,8	0,5
Gallium.. .	Ga	70	1	2 Tellure. . .	Te	125	3
2 Glucinium .	Gl	9,1	0,2	4 Thorium. .	Th	233	1
Hydrogène.	H	1	0,005	2 Titane . . .	Ti	48,1	0,1
2 Mercure . .	Hg	200,1	0,2	Thallium. .	Tl	204,2	0,5
3 Indium. . .	In	113,7	0,5	4 Uranium. .	Ur	240	1
2 Iridium.. .	Ir	193	0,2	Vanadium .	Va	51,3	0,1
Iode	Io	126,86	0,01	2 Tungstène .	W ou Tu	184	0,2
Potassium .	K	39,144	0,01	3 Ytterbium .	Yb	173	1
3 Lanthane. .	La	138	2	3 Yttrium.. .	Yt	89,5	1
Lithium.. .	Li	7,02	0,01	2 Zinc	Zn	65,3	0,1
2 Magnésium	Mg	24,4	0,05	3 Zinconium .	Zr	90,5	1
2 Manganèse.	Mn	55	0,1				

460. Nous avons réuni dans les tableaux suivants les formules chimiques équivalentistes des principaux corps, ainsi que leurs équivalents.

Les équivalents du soufre, de l'oxygène, du fer et de l'hydrogène étant respectivement 16, 8, 28 et 1, l'équivalent du sulfate de protoxyde de fer :

$$SO^3, FeO + 7HO,$$

est : $(16 + 8 \times 3) + (28 + 8) + 7(1 + 8) = 40 + 36 + 63 = 139.$

Pour avoir les quantités respectives d'acide sulfurique, de protoxyde de fer et d'eau qui entrent dans un poids donné de sulfate de protoxyde de fer, il suffit de diviser ce poids en quantités proportionnelles aux nombres 40, 36 et 63 (*Int.* 389).

Au moyen de la règle ci-dessus (458 *bis*), on pourra transformer facilement les formules de ces corps en nouvelles formules atomiques.

TABLEAU

des formules chimiques des corps, et de leurs équivalents chimiques selon que 100 est celui de l'oxygène ou que 1 est celui de l'hydrogène.

CORPS.	FORMULES CHIMIQUES.	ÉQUIVALENTS chimiques. Oxygène 100.	ÉQUIVALENTS chimiques. Hydrogène 1.
1° CHIMIE INORGANIQUE. (Chimie organique, page 566).			
Aluminium	Al	170,87	13,67
Alumine	Al^2O^3	641,75	51,34
Aluminate de potasse	Al^2O^3, KO	1229,25	98,34
Aluminate de soude	$2Al^2O^3, 3NaO$	2446,00	195,68
Chlorure d'aluminium	Al^2, Cl^3	1673,00	133,84
Fluorure —	Al^2, Fl^3	1054,25	84,34
Cryolithe	$3NaFl+Al^2Fl^3$	2629,25	210,34
Sulfure d'aluminium	Al^2S^3	941,75	75,34
Sulfate d'alumine	$3SO^3, Al^2O^3$	2141,75	171,34
Sulfate d'alumine cristallisé	$3SO^3, Al^2O^3+18HO$	4166,75	333,34
Sous-sulfate d'alumine (*websterite*)	SO^3, Al^2O^3	1141,75	91,34
Alun de potasse (alun ordinaire)	$3SO^3, Al^2O^3+SO^3, KO+24HO$	5931,00	474,48
Alun de Rome	$3(SO^3, Al^2O^3)+SO^3, KO+9HO$	5525,25	442,02
Alun d'ammoniaque	$3SO^3, Al^2O^3+SO^3, AzH^3, HO+24HO$	5666,75	453,34
Composés ou aluns dans lesquels le peroxyde de fer, l'oxyde de chrome, le sesquioxyde de manganèse, etc., remplacent l'alumine	$3SO^3, Fe^2O^3+SO^3, KO+24HO$	6287,50	503,00
	$3SO^3, Cr^2O^3+SO^3, KO+24HO$	6245,00	499,60
	$3SO^3, Mn^2O^3+SO^3, KO+24HO$	6275,00	502,00
Argiles et poteries (voir 5e partie).			
Ammoniaque	AzH^3	212,50	17,00
Ammonium (théorique jusqu'à présent)	$Am=AzH^4$	225,00	18,00
Chlorure d'ammonium	$AmCl$	668,75	53,50
Iodure —	AmI	1812,50	145,00
Sulfure —	AmS	425,00	34,00
Sulfhydrate de sulfure d'ammonium	AmS, HS	637,50	51,00
Chloroplatinate de chlorure d'ammonium	$AmCl, PtCl^2$	2787,50	223,00
Sulfate d'ammonium	AmO, SO^3	825,00	66,00
Azotate —	AmO, AzO^5	1000,00	80,00
Oxalate —	AmO, C^2O^3	775,00	62,00
Chlorhydrate d'ammoniaque (*sel ammoniac*)	$AzH^3, ClH=AzH^4, Cl$	668,75	53,50
Bromhydrate d'ammoniaque	$AzH^3, BrH=AzH^4, Br$	1225,00	98,00
Iodhydrate —	$AzH^3, IH=AzH^4, I$	1812,50	145,00
Fluorhydrate —	$AzH^3, FlH=AzH^4, Fl$	462,50	37,00
Sulfhydrate —	$AzH^3, SH=AzH^4, S$	425,00	34,00
Bisulfhydrate —	$AzH^3, 2SH=AzH^4, S+SH$	637,50	51,00
Sulfure d'ammonium monosulfuré (*liqueur fumante de Boyle*)	AzH^4, S^2	625,00	50,00
Sulfhydrate d'ammoniaque trisulfuré	$AzH^3, SH, S^3=AzH^4, S^4$	1025,00	82,00
Sulfhydrate d'ammoniaque quadrisulfuré	$AzH^3, SH, S^4=AzH^4, S^5$	1225,00	98,00
Sulfhydrate d'ammoniaque sextisulfuré	$AzH^3, SH, S^6=AzH^4, S^7$	1625,00	130,00
Carbonate neutre d'ammoniaque	CO^2, AzH^3, HO	600,00	48,00
Sesquicarbonate —	$\frac{3}{2} CO^2, AzH^3, HO$	737,50	59,00

CORPS.	FORMULES CHIMIQUES.	ÉQUIVALENTS chimiques. Oxygène 100.	Hydrog. 1.
Bicarbonate d'ammoniaque. . . .	$2CO^2, AzH^3, 2HO$	987,50	79,00
Phosphate d'ammoniaque du commerce.	$PhO^5, 2AzH^3, 3HO$	1650,00	132,00
Phosphate acide d'ammoniaque. .	$PhO^5, AzH^3, 3HO$	1437,50	115,00
Arséniate d'ammoniaque.	$AsO^5, 2AzH^3, 3HO$	2200,00	176,00
Arséniate acide d'ammoniaque. . .	$AsO^5, AzH^3, 3HO$	1987,50	159,00
Sulfate neutre d'ammoniaque. . .	$SO^3, AzH^3, HO = SO^3, AzH^4O$	825,00	66,00
Sulfamide.	$4SO^3, 3AzH^3$	2637,50	211,00
Sulfate double d'ammoniaque et de baryte.	$3SO^3, AzH^3, 2BaO$	3625,00	290,00
Parasulfatammon et *sulfatammon*.	$SO^3, AzH^3 = SO^2, AzH^2, HO$	712,50	57,00
Azotate d'ammoniaque.	$AzO^5, AzH^3, HO = AzO^5, AzH^4O$	1000,00	80,00
Chlorate —	$ClO^5, AzH^3, HO = ClO^5, AzH^4O$	1268,75	101,50
Iodate —	$IO^5, AzH^3, HO = IO^5, AzH^4O$	2412,50	193,00
Oxamide.	C^4O^4, Az^2H^4	1100,00	88,00
Acide oxamique.	C^4H^3, AzO^6	1112,50	89,00
Acétamide.	C^4H^5, AzO^2	737,50	59,00
Acétonitrile.	C^4H^3Az	512,50	41,00
Benzamide.	$C^{14}H^7, AzO^2$	1512,50	121,00
Benzonitrile.	$C^{14}H^5Az$	1287,50	103,00
Antimoine.	Sb	1525,00	122,00
Oxyde d'antimoine.	Sb^2O^3	3350,00	268,00
— — hydraté.	Sb^2O^3, HO	3462,50	277,00
Acide antimonique.	Sb^2O^5	3550,00	284,00
— — hydraté. . . .	Sb^2O^5, HO	3662,50	293,00
Acide méta-antimonique.	$Sb^2O^5, 2HO$	3775,00	302,00
Acide antimonieux ou antimoniate d'oxyde d'antimoine.	$Sb^2O^3 + Sb^2O^5$	6900,00	552,00
Antimoniate de potasse.	Sb^2O^5, KO	4137,50	331,00
— — hydraté. .	$Sb^2O^5, KO, 5HO$	4700,00	376,00
Biantimoniate de potasse.	$2Sb^2O^5, KO$	7687,50	615,00
Méta-antimoniate de potasse cristallisé.	$Sb^2O^5, 2KO$	4725,00	378,00
Méta-antimoniate de potasse acide.	$Sb^2O^5, KO, 7HO$	4925,00	394,00
Hydrogène antimonié.	SbH^3	1562,50	125,00
Protosulfure d'antimoine.	Sb^2S^3	3650,00	292,00
Acide sulfoantimonique.	Sb^2S^5	4050,00	324,00
Sulfoantimoniate de sulfure de sodium.	$3NaS, Sb^2S^5 + 18HO$	7537,50	603,00
Protochlorure d'antimoine (beurre d'antimoine).	Sb^2Cl^3	4381,25	350,50
Perchlorure d'antimoine (*). . . .	Sb^2Cl^5	5268,75	421,50
Oxychlorure d'antimoine (*poudre d'Algaroth*).	Sb^2O^2Cl	3693,75	295,50
Chlorosulfure d'antimoine.	$Sb^2Cl^3S^2$	4781,25	382,50
Sulfate d'antimoine.	$4SO^3, Sb^2O^3 + HO$	5462,50	437,00
	$2SO^3, Sb^2O^3$	4350,00	348,00
	SO^3, Sb^2O^3	3850,00	308,00
	$SO^3, 2Sb^2O^3$	7200,00	576,00
Azotate d'antimoine.	$AzO^5, 2Sb^2O^3$	7375,00	590,00
Oxalate d'antimoine.	C^4O^6, Sb^2O^3, HO	4362,50	349,00
Tartrate d'antimoine.	$2C^8H^2O^8, Sb^2O^3 + 12HO$	7550,00	604,00
	$C^8H^2O^8, Sb^2O^3 + HO$	4887,50	391,00
Tartrate double d'antimoine et de potasse (*émétique ou tartre stibié*).	$C^8H^2O^8, Sb^2O^3, KO + HO$	5475,00	438,00

(*) Le brome et l'iode donnent du bromure et de l'iodure d'antimoine.

CORPS.	FORMULES CHIMIQUES.	ÉQUIVALENTS chimiques. Oxygène. 100.	ÉQUIVALENTS chimiques. Hydrog. 1.
Argent	Ag	1350,00	108,00
Sous-oxyde d'argent	Ag^2O	2800,00	224,00
Protoxyde d'argent	AgO	1450,00	116,00
Bioxyde d'argent	AgO^2	1550,00	124,00
Sulfure d'argent	AgS	1550,00	124,00
Sulfoantimoniure d'argent (minerai)	$3AgS, Sb^2S^3$	8300,00	664,00
Sulfoarséniure d'argent (minerai)	$3AgS, AsS^3$	6187,50	495,00
Chlorure d'argent	AgCl	1793,75	143,50
Bromure d'argent	AgBr	2350,00	188,00
Iodure d'argent	AgI	2937,50	235,00
Iodure double d'argent et de potassium	AgI+KI	5012,50	401,00
Cyanure d'argent	$AgCy=AgC^2Az$	1675,00	134,00
Protocarbure d'argent	AgC	1425,00	114,00
Bicarbure d'argent	AgC^2	1500,00	120,00
Azotate d'argent (fondu, *pierre infernale*)	AzO^5, AgO	2125,00	170,00
Azotate d'argent ammoniacal	$AzO^5, AgO+3AzH^3$	2762,50	221,00
Sulfate d'argent	SO^3, AgO	1950,00	156,00
— — ammoniacal	$SO^3, AgO+2AzH^3$	2375,00	190,00
Arsenic	As	937,50	75,00
Acide arsénieux (*mort-aux-rats*)	AsO^3	1237,50	99,00
Acide arsénique anhydre	AsO^5	1437,50	115,00
— — hydraté	AsO^5, HO ou 2HO ou 3HO ou 4HO	»	»
Hydrogène arsénié	AsH^3	975,00	78,00
Azote (*voir* Ammoniaque et Cyanogène)	Az	175,00	14,00
Protoxyde d'azote	AzO	275,00	22,00
Bioxyde d'azote	AzO^2	375,00	30,00
Acide azoteux	AzO^3	475,00	38,00
— hypoazotique	AzO^4	575,00	46,00
— azotique anhydre	AzO^5	675,00	54,00
— — hydraté	AzO^5,HO ou 4HO	»	»
Azoture de potassium	AzK^3	1637,50	131,00
— de sodium	$AzNa^3$	1037,50	83,00
Barium	Ba	856,25	68,50
Protoxyde de barium (*baryte*)	BaO	956,25	76,50
Baryte hydratée	BaO, HO	1068,75	85,50
Baryte cristallisée	BaO+10HO	2081,25	166,50
Bioxyde de barium	BaO^2	1056,25	84,50
Sulfure de barium	BaS	1056,25	84,50
Chlorure de barium	BaCl	1300,00	104,00
— — hydraté	BaCl, 2HO	1525,00	122,00
Carbonate de baryte (*withérite*)	CO^2, BaO	1231,25	98,50
Sulfate de baryte (*spath pesant*)	SO^3, BaO	1456,25	116,50
Azotate de baryte	AzO^5, BaO	1631,25	130,50
Bismuth	Bi	1330,00	106,40
Oxyde de bismuth	Bi^2O^3	2960,00	236,80
Acide bismuthique	Bi^2O^5	3160,00	252,80
Oxyde salin	$Bi^2O^3, Bi^2O^5=2BiO^4$	6120,00	489,60
Bismuthate acide de potasse	$Bi^2O^5, KO+Bi^2O^5$, HO	7020,00	561,60
Sulfure de bismuth	Bi^2S^3	3260,00	260,80
Chlorure de bismuth	Bi^2Cl^3	3991,25	319,30
Oxychlorure de bismuth (*blanc de perle*)	Bi^2O^2Cl+HO	3528,75	282,30
Azotate neutre de bismuth	$3AzO^5, Bi^2O^3+3HO$	5322,50	425,80
Sous-azotate de bismuth (*blanc de fard*)	AzO^5, Bi^2O^3+2HO	3860,00	308,80

CORPS.	FORMULES CHIMIQUES.	ÉQUIVALENTS chimiques. Oxygène 100.	Hydrog. 1.
Bore	Bo	136,12	10,89
Acide borique fondu	BoO^3	436,12	34,89
— — cristallisé	BoO^3, 3HO	773,62	61,89
Chlorure de bore	$BoCl^3$	1467,50	117,40
Bromure de bore	$BoBr^3$	3136,12	250,89
Sulfure de bore	BoS^3	736,12	58,89
Fluorure de bore	$BoFl^3$	848,62	67,89
Acide fluoborique	BoO^3, $3FlH = BoFl^3 + 3HO$	1186,12	94,89
Brome	Br	1000,00	80,00
Acide bromique	BrO^5	1500,00	120,00
— bromhydrique	BrH	1012,50	81,00
Bromure de phosphore	$PhBr^3$	3387,50	271,00
	$PhBr^5 = PhBr^3, Br^2$	5387,50	431,00
Cadmium	Cd	700,00	56,00
Oxyde de cadmium	CdO	800,00	64,00
Chlorure, sulfure, iodure de cadmium	CdCl, S, I	»	»
Sulfate de cadmium	SO^3, $CdO + 4HO$	1750,00	140,00
Calcium	Ca	250,00	20,00
Protoxyde de calcium (*chaux*)	CaO	350,00	28,00
Chaux hydratée	CaO, HO	462,50	37,00
Chaux vive abandonnée à l'air	CaO, $CO^2 + CaO$, HO	1087,50	87,00
Bioxyde de calcium	CaO^2	450,00	36,00
Chlorure de calcium	CaCl	693,75	55,50
— — cristallisé	$CaCl + 6HO$	1368,75	109,50
Oxychlorure de calcium cristallisé	$CaCl + 3CaO + 15HO$	3431,25	274,50
Bromure de calcium	CaBr	1250,00	100,00
Iodure —	CAI	1837,50	147,00
Fluorure — (*spath fluor*)	CaFl	487,50	39,00
Carbonate de chaux (*spath d'Islande*, *arragonite*, *marbre*, *craie*, etc.)	CO^2, CaO	625,00	50,00
Carbonate de chaux hydraté	CO^2, $CaO + 5HO$	1187,50	95,00
Sulfate de chaux anhydre (*anhydrite*)	SO^3, CaO	850,00	68,00
Sulfate de chaux hydraté (*gypse*, *pierre à plâtre*, *pierre à Jésus*)	SO^3, $CaO + 2HO$	1075,00	86,00
Phosphate de chaux (*des os*)	PhO^5, 3CaO	1937,50	155,00
Apatite	$3(PhO^5, 3CaO) + CaCl$	6506,25	520,50
Autre phosphate, tribasique	PhO^5, (2CaO, HO)	1700,00	136,00
Phosphate acide	PhO^5, (CaO, 2HO)	1462,50	117,00
Métaphosphate (le précédent calciné)	PhO^5, CaO	1237,50	99,00
Hypochlorite de chaux	ClO, CaO	893,75	71,50
Chlorure de chaux du commerce (mélange d'hypochlorite de chaux, de chlorure de calcium et de chaux hydratée)			
Carbone	C	75,00	6,00
Oxyde de carbone	CO	175,00	14,00
Acide carbonique	CO^2	275,00	22,00
— oxalique	C^2O^3	450,00	36,00
— mellitique	C^4O^3	600,00	48,00
— croconique	C^5O^4	775,00	62,00
— chloroxycarbonique	CO, Cl	618,75	49,50
— rhodizonique	C^7O^7	1225,00	98,00
Hydrogène protocarboné (*gaz des marais*, *grisou* dans les mines de houille)	C^2H^4	200,00	16,00

CORPS.	FORMULES CHIMIQUES.	ÉQUIVALENTS chimiques. Oxygène 100.	Hydrog. 1.
Produits fournis par l'action du chlore sur l'hydrogène protocarboné.	C^2H^3Cl	631,25	50,50
	$C^2H^2Cl^2$	1062,50	85,00
	C^2HCl^3 (chloroforme)	1493,75	119,50
	C^2Cl^4	1925,00	154,00
Hydrogène bicarboné (gaz oléfiant).	C^4H^4	350,00	28,00
Liqueur des Hollandais.	$C^4H^4Cl^2$	1237,50	99,00
Action du chlore sur l'hydrogène bicarboné.	$C^4H^3Cl^3$	1668,75	133,50
	$C^4H^2Cl^4$	2100,00	168,00
	C^4HCl^5	2531,25	202,50
	C^4Cl^6	2962,50	237,00
Action d'une dissolution alcoolique de potasse sur les corps précédents.	C^4H^3Cl	781,25	62,50
	$C^4H^2Cl^2$	1212,50	97,00
	C^4HCl^3	1643,75	131,50
	C^4Cl^4	2075,00	166,00
Action du brome sur l'hydrogène bicarboné.	$C^4H^4Br^2$	2350,00	188,00
	$C^4H^3Br^3$	3337,50	267,00
	$C^4H^2Br^4$	4325,00	346,00
	C^4HBr^5	5312,50	425,00
Action d'une dissolution alcoolique de potasse sur les corps précédents.	C^4H^3Br	1337,50	107,00
	$C^4H^2Br^2$	2325,00	186,00
	C^4HBr^3	3312,50	265,00
	C^4Br^4	4300,00	344,00
Action de l'iode sur l'hydrogène bicarboné.	$C^4H^4I^2$	3525,00	282,00
Action de la dissolution alcoolique de potasse.	C^4H^3I	1925,00	154,00
Propylène.	C^6H^6	525,00	42,00
	Chlore. — Dissol. alcool.		
Le chlore et le brome donnent avec le propylène des produits analogues aux précédents, ainsi que la dissolution alcoolique.	$C^6H^6Cl^2$ — C^6H^5Cl	»	»
	$C^6H^5Cl^3$ — $C^6H^4Cl^2$	»	»
	$C^6H^4Cl^4$ — $C^6H^3Cl^3$	»	»
	$C^6H^3Cl^5$ — $C^6H^2Cl^4$	»	»
	$C^6H^2Cl^6$ — C^6HCl^5	»	»
	C^6HCl^7 — C^6Cl^6	»	»
	C^6Cl^8	»	»
Iodure de phosphore sur la glycérine.	C^6H^5I	2100,00	168,00
Butylène.	C^8H^8	700,00	56,00
Amylène.	$C^{10}H^{10}$	875,00	70,00
Paramylène.	$C^{20}H^{20}$	1750,00	140,00
Caprylène.	$C^{16}H^{16}$	1400,00	112,00
Cétène.	$C^{32}H^{32}$	2800,00	224,00
Distillation du goudron de houille. — Benzène.	$C^{12}H^6$	975,00	78,00
— Toluène.	$C^{14}H^8$	1150,00	92,00
— Xylène.	$C^{16}H^{10}$	1325,00	106,00
— Cumène.	$C^{18}H^{12}$	1500,00	120,00
— Cymène.	$C^{20}H^{14}$	1675,00	134,00
Azoture de carbone (*cyanogène*).	$C^2Az=Cy$	325,00	26,00
Cyanogène et eau = oxalate d'ammoniaque.	$C^2Az+4HO=AzH^3,HO,C^2O^3$	775,00	62,00
Cyanogène et acide sulfhydrique.	$C^4Az^2H^2S^2=2C^2Az+2HS$	1075,00	86,00
	$C^4Az^2H^4S^4=2C^2Az+4HS$	1500,00	120,00
Acide cyanhydrique.	C^2AzH	337,50	27,00
— cyanique.	CyO, HO	537,50	43,00
— cyanurique.	$Cy^3O^3, 3HO$	1612,50	129,00
Chlorure de cyanogène gazeux.	$CyCl$	768,75	61,50
— — liquide.	Cy^2Cl^2	1537,50	123,00
— — solide.	Cy^3Cl^3	2306,25	184,50

CORPS.	FORMULES CHIMIQUES.	ÉQUIVALENTS chimiques.	
		Oxygène 100.	Hydrog. 1.
Bromure de cyanogène	CyBr	1325,00	106,00
Iodure de cyanogène	CyI	1912,50	153,00
Chlorures de carbone	C^2Cl^4	1925,00	154,00
	C^4Cl^6	2962,50	237,00
	C^4Cl^4	2075,00	166,00
Sulfure de carbone	CS^2	475,00	38,00
Cérium	Ce	590,80	47,26
Protoxyde de cérium	CeO	690,80	55,26
Sesquioxyde de cérium	Ce^2O^3	1481,60	118,53
Chlore	Cl	443,75	35,50
Acide hypochloreux	ClO	543,75	43,50
— chloreux	ClO^3	743,75	59,50
— hypochlorique	ClO^4	843,75	67,50
— chlorique	ClO^5	943,75	75,50
— perchlorique	ClO^7	1143,75	91,50
— chlorhydrique	ClH	456,25	36,50
— — hydraté	ClH+6HO ou 12HO ou 16HO	»	»
Eau régale	AzO^5+ClH	»	»
Acide *chloronitreux*	AzO^2Cl^2	»	»
— *chloronitrique*	AzO^2Cl	»	»
Chlorure d'azote	$AzCl^3$	1506,25	120,50
Protochlorure de soufre	S^2Cl	843,75	67,50
Bichlorure de soufre	SCl	643,75	51,50
Protochlorure de phosphore	$PhCl^3$	1718,75	137,50
Perchlorure —	$PhCl^5=PhCl^3, Cl^2$	2606,25	208,50
Chloroxyde —	$PhCl^3, O^2$	1918,75	153,50
Chlorosulfure —	$PhCl^3, S^2$	2118,75	169,50
Chlorure d'arsenic	$AsCl^3$	2268,75	181,50
Chrome	Cr	328,75	26,30
Protoxyde de chrome	CrO	428,75	34,30
Oxyde salin de chrome	$Cr^3O^4=CrO+Cr^2O^3$	1386,25	110,90
Sesquioxyde de chrome	Cr^2O^3	957,50	76,60
— — hydraté	Cr^2O^3, 2HO	1182,50	94,60
Bioxyde de chrome	$3CrO^2=CrO^3, Cr^2O^3$	»	»
Acide chromique	CrO^3	628,75	50,30
— perchromique	Cr^2O^7	1357,50	108,60
— chlorochromique	CrO^2, Cl	972,50	77,80
Protochlorure de chrome	CrCl	772,50	61,80
Sesquichlorure de chrome	Cr^2Cl^3	1988,75	159,10
Oxychlorure —	Cr^2Cl^2O	1645,00	131,60
	Cr^2ClO^2	1301,25	104,10
Chromate neutre de potasse	CrO^3, KO	1216,25	97,30
Bichromate de potasse	$2CrO^3$, KO	1845,00	147,60
Bichromate de chlorure de potassium	$2CrO^3$, KCl+HO	2301,25	184,10
Alun de chrome	$3SO^3, Cr^2O^3+SO^3$, KO+24HO	6245,00	499,60
Cobalt	Co	368,75	29,50
Protoxyde de cobalt	CoO	468,75	37,50
Oxyde salin de cobalt	$Co^3O^4=CoO, Co^2O^3$	1506,25	120,50
Sesquioxyde de cobalt	Co^2O^3	1037,50	83,00
Chlorure de cobalt	CoCl	812,50	65,00
Chlorure de cobalt ammoniacal	CoCl, $2AzH^3$	1237,50	99,00
Smalt, ou *bleu d'azur*	»	»	»
Bleu de cobalt, ou *bleu Thénard*	»	»	»
Azotate de cobalt	AzO^5, CoO+2HO	1368,75	109,50
Sulfate — (tempér. ordin.)	SO^3,CoO+7HO	1756,25	140,50
— — (vers 30°)	SO^3, CoO+6HO	1643,75	131,50
Cæsium	Cs	1541,25	123,30

CORPS.	FORMULES CHIMIQUES.	ÉQUIVALENTS chimiques.	
		Oxygène 100.	Hydrog. 1.
Cuivre	Cu	396,87	31,75
Sous-oxyde de cuivre	Cu^2O	893,74	71,50
— — hydraté	$4Cu^2O+HO$	3687,46	295,00
Protoxyde de cuivre	CuO	496,87	39,75
— — hydraté	$CuO+HO$	609,37	48,75
Bioxyde de cuivre	CuO^2	596,87	47,75
Hydrure de cuivre	Cu^2H	806,25	64,50
Azoture de cuivre	Cu^6Az	2556,25	204,50
Sous-sulfure de cuivre (*)	Cu^2S	993,75	79,50
Sulfure de cuivre	CuS	596,87	47,75
Sous-chlorure de cuivre	Cu^2Cl	1237,50	99,00
Chlorure de cuivre	$CuCl$	840,62	67,25
— — cristallisé	$CuCl+2HO$	1462,50	117,00
Sulfate de cuivre (*vitriol bleu*)	$SO^3, CuO+5HO$	1559,37	124,75
— — chauffé à 100°	$SO^3,CuO+HO$	1109,37	88,75
— — chauffé à 200°	SO^3, CuO	996,87	79,75
Sous-sulfate de cuivre	$SO^3, CuO, HO+2(CuO, HO)$	2328,12	186,25
Sulfate de cuivre tribasique	$SO^3, CuO+3CuO$	2487,50	199,00
Sulfate de cuivre traité par l'ammoniaque (cristaux)	$SO^3, CuO+2AzH^3+HO$	1534,37	122,75
Azotate de cuivre	$AzO^5, CuO+4HO$	1621,87	129,75
— — quadribasique	$AzO^5, 4CuO$	2662,50	213,00
Azotate de cuivre traité par l'ammoniaque (cristaux)	$AzO^5, CuO+2AzH^3$	1596,87	127,75
Carbonate de cuivre bibasique (vert minéral)	$CO^2, 2CuO+HO$	1381,25	110,50
Hydrocarbonate de cuivre (bleu minéral)	$CO^2, 2CuO+CuO, HO$	1878,11	150,25
Hydrocarbonate de cuivre (*malachite*)	$CO^2, CuO+CuO, HO$	1381,25	110,50
Carbonate de cuivre sesquibasique (*azurite*)	$2CO^2, 3CuO, HO$	2153,11	172,25
Arsénite de cuivre (*vert de Scheele*)	$AsO^3, 2CuO$	2231,25	178,50
Acétate neutre de cuivre cristallisé (*verdet*)	$C^4H^3O^3, CuO+HO$	1246,87	99,75
Acétate de cuivre à 5 équivalents d'eau	$C^4H^3O^3, CuO+5HO$	1696,87	135,75
Acétate de cuivre bibasique (vert de gris)	$C^4H^3O^3, CuO+CuO, HO+5HO$	2306,25	184,50
Acétate de cuivre tribasique	$C^4H^3O^3,3CuO$	2128,11	170,25
Acétate de cuivre sesquibasique	$2C^4H^3O^3, 3CuO$	2765,61	221,25
Alliage de cuivre et de zinc	Laiton	»	»
— — et d'étain	Bronze	»	»
Sel double (*vert de Schweinfurt*)	$C^4H^3O^3, CuO+3(AsO^3, 2CuO)$	7828,10	626,25
Didyme	Di	»	»
Eau (*voir* Hydrogène)	HO	112,50	9,00
Erbium	Er	»	»
Etain	Sn	737,50	59,00
Protoxyde d'étain	SnO	837,50	67,00
Bioxyde d'étain ou acide stannique	SnO^2	937,50	75,00
Bioxyde d'étain ou acide métastannique	$Sn^5O^{10}, 10HO$	5812,50	465,00
Acide stannique hydraté	SnO^2, HO	1050,00	84,00
Formule générale des stannates	SnO^2, MO	»	»
Formule générale des métastannates	$Sn^5O^{10}, MO+4HO$	»	»

(*) Ce sous-sulfure se trouve souvent dans la nature combiné avec le sulfure de fer Fe^2S^3, et constitue le minerai appelé *pyrite de cuivre, cuivre panaché;* c'est le principal minerai de cuivre de l'Europe.

CORPS.	FORMULES CHIMIQUES.	ÉQUIVALENTS chimiques. Oxygène 100.	Hydrog. 1.
Protosulfure d'étain	SnS	937,50	75,00
Bisulfure d'étain	SnS^2	1137,50	91,00
Protochlorure d'étain anhydre	$SnCl$	1181,25	94,50
— — cristallisé	$SnCl+2HO$	1406,25	112,50
Oxychlorure d'étain	$SnCl+SnO$	2018,75	161,50
Bichlorure d'étain (*liqueur fumante de Libavius*)	$SnCl^2$	1625,00	130,00
Bichlorure d'étain cristallisé	$SnCl^2+5HO$	2187,50	175,00
Protobromure d'étain	$SnBr$	1737,50	139,00
Bibromure d'étain	$SnBr^2$	2737,50	219,00
Protoïodure d'étain	SnI	2325,00	186,00
Iodures doubles. Formule générale.	SnI, MI	»	»
Biiodure d'étain	SnI^2	3912,50	313,00
Alliages d'étain et de plomb	Soudure des plombiers	»	»
Fer	Fe	350,00	28,00
Protoxyde de fer	FeO	450,00	36,00
Sesquioxyde de fer (*fer oligiste, fer spéculaire, hématite rouge* ou *sanguine*, et *colcothar*)	Fe^2O^3	1000,00	80,00
Sesquioxyde de fer hydraté	Fe^2O^3+HO	1112,50	89,00
Sesquioxyde de fer (*hématite brune, fer limoneux et oolithique*)	$2(Fe^2O^3)+3HO$	2337,50	187,00
Oxyde de fer magnétique	$Fe^3O^4=FeO+Fe^2O^3$	1450,00	116,00
Acide ferrique	FeO^3	650,00	52,00
Protosulfure de fer	FeS	550,00	44,00
Sesquisulfure de fer	Fe^2S^3	1300,00	104,00
Bisulfure de fer (*pyrite*)	FeS^2	750,00	60,00
Sulfure de fer magnétique (*pyrite magnétique*)	$Fe^7S^8=6FeS+FeS^2$	4050,00	324,00
Protochlorure de fer	$FeCl$	793,75	63,50
— — cristallisé	$FeCl+6HO$	1468,75	117,50
Sesquichlorure de fer	Fe^2Cl^3	2031,25	162,50
— — hydraté	Fe^2Cl^3+12HO	3381,25	270,50
Protocyanoferrure de fer	$FeCy$	675,00	54,00
Sesquicyanoferrure de fer	Fe^2Cy^3	1675,00	134,00
Cyanoferrure de potassium (*prussiate jaune*)	$FeCy^3, K^2+3HO$ (*a*)	2637,50	211,00
Cyaniferride de potassium (*prussiate rouge*)	Fe^2Cy^6, K^3 (*b*)	4112,50	329,00
Acide cyanoferrhydrique	$FeCy^3, H^2$	1350,00	108,00
Acide cyaniferrhydrique	Fe^2Cy^6, H^3	2687,50	215,00
Bleu de Prusse	Fe^7Cy^9+9HO	6387,50	511,00
Bleu de Turnbull	Fe^5Cy^6	3700,00	296,00
Carbure de fer (*acier* et *fonte*)	Composition non définie	»	»
Sulfate de protoxyde de fer (*couperose verte*)	SO^3, FeO	950,00	76,00
Sulfate de protoxyde de fer (cristallisé à la température ordinaire)	$SO^3, FeO+7HO$	1737,50	139,00
Sulfate du protoxyde de fer (séché à 100 degrés)	$SO^3, FeO+HO$	1062,50	85,00
Sulfate de peroxyde de fer	$3SO^3, Fe^2O^3$	2500,00	200,00
Silicate de fer (transformation de la fonte en fer)	$SiO^3, 3FeO$	1912,50	153,00
Fluor	Fl	237,50	19,00
Acide fluorhydrique	FlH	250,00	20,00
— — hydraté	$FlH+4HO$	700,00	56,00

(*a*) K^2 peut être remplacé par M^2, M représentant un métal quelconque.
(*b*) K^3 *id.* M^3 *id.*

CORPS.	FORMULES CHIMIQUES.	ÉQUIVALENTS chimiques. Oxygène 100.	Hydrog. 1.
Glucinium	Gl	87,00	6,96
Glucine	GlO	187,00	14,96
Chlorure de glucinium	GlCl	530,75	42,46
Sulfate de glucine	SO^3, GlO+4HO	1137,00	90,96
Silicate double de glucine et d'alumine	*Émeraude*	»	»
Hydrogène	H	12,50	1,00
Protoxyde d'hydrogène (*eau*)	HO	112,50	9,00
Bioxyde d'hydrog. (*eau oxygénée*)	HO^2	212,50	17,00
Ilménium	Il	»	»
Iode	I	1587,50	127,00
Acide iodeux (douteux)	IO^3	1887,50	151,00
— hypoiodique	IO^4	1987,50	159,00
— iodique	IO^5	2087,50	167,00
— hyperiodique	IO^7	2287,50	183,00
— iodhydrique	IH	1600,00	128,00
Iodure d'azote (d'après M. Bineau)	$AzHI^2$	3362,50	269,00
— (d'après M. Bunsen)	$Az^2H^3I^3$=AzI^3, AzH^3	5150,00	412,00
Iodures de phosphore	PhI^2	3562,50	285,00
	PhI^3	5150,00	412,00
Iridium	Ir	1231,25	98,50
Protoxyde d'iridium	IrO	1331,25	106,50
Sesquioxyde d'iridium	Ir^2O^3	2762,50	221,00
Bioxyde —	IrO^2	1431,25	114,50
— — hydraté	IrO^2+2HO	1656,25	132,50
Trioxyde d'iridium	IrO^3	1531,25	122,50
Protochlorure d'iridium	IrCl	1675,00	134,00
Sesquichlorure —	Ir^2Cl^3	3793,75	303,50
Bichlorure —	$IrCl^2$	2118,75	169,50
Trichlorure —	$IrCl^3$	2562,50	205,00
Chlorure double d'iridium et de potassium	$IrCl^2$+KCl+HO	3162,50	253,00
Lanthane	La	600,00	48,00
Lithium	Li	81,25	6,50
Protoxyde de lithium anhydre	LiO	181,25	14,50
Lithine	LiO+HO	293,75	23,50
Peroxyde de lithium	LiO^3	381,25	30,50
Magnésium	Mg	150,00	12,00
Magnésie	MgO	250,00	20,00
Monohydrate de magnésie	MgO+HO	362,50	29,00
Chlorure de magnésium	MgCl	593,75	47,50
— — hydraté	MgCl+5HO	1156,25	92,50
Fluorure, bromure et iodure de magnésium	»	»	»
Sulfate de magnésie (contenu dans les eaux de Sedlitz, de Pullna et d'Epsom)	»	»	»
Sulfate de magnésie cristallisé à la température ordinaire	SO^3, MgO+7HO	1537,50	123,00
— cristallisé à +30°	SO^3, MgO+6HO	1425,00	114,00
— cristallisé à 0°	SO^3, MgO+12HO	2100,00	168,00
— chauffé à 132°	SO^3, MgO+HO	862,50	69,00
— chauffé à 210°	SO^3, MgO	750,00	60,00
Silicate de magnésie (*écume de mer, péridot, talc, serpentine, pyroxène et amphibole*)	»	»	»
Carbonate de magnésie naturel	CO^2, MgO	525,00	42,00
Carbonate de magnésie cristallisé à la température ordinaire	CO^2, MgO+3HO	862,50	69,00

CORPS.	FORMULES CHIMIQUES.	ÉQUIVALENTS chimiques. Oxygène. 100.	Hydrog. 1.
Carbonate de magnésie cristallisé à une très-basse température.	CO^2, $MgO+5HO$	1087,50	87,00
Dolomie.	CO^2, $MgO+CO^2$, CaO	1150,00	92,00
Magnésie blanche des pharmaciens.	$3(CO^2, MgO)+MgO, HO+3HO$	2275,00	182,00
Phosphate de magnésie (Aq. eau).	$PhO^5(2MgO, HO)+Aq$	»	»
Phosphate ammoniaco-magnésien.	$PhO^5(2MgO, AzH^3, HO)+12HO$	3062,50	245,00
Manganèse.	Mn	343,75	27,50
Protoxyde de manganèse.	MnO	443,75	35,50
Sesquioxyde —	Mn^2O^3	987,50	79,00
Oxyde rouge —	$Mn^3O^4=MnO, Mn^2O^3$	1431,25	114,50
Bioxyde —	MnO^2	543,75	43,50
Acide manganique.	MnO^3	643,75	51,50
Acide hypermanganique.	Mn^2O^7	1387,50	111,00
Sulfure de manganèse.	MnS	543,75	43,50
Protochlorure de mangan. anhydre.	$MnCl$	787,50	63,00
— — cristallisé.	$MnCl+4HO$	1237,50	99,00
Sesquichlorure de manganèse.	Mn^2Cl^3	2018,75	161,50
Sulfate de manganèse cristallisé au-dessous de 6°.	SO^3, $MnO+7HO$	1731,25	138,50
— — entre 6 et 20°.	SO^3, $MnO+6HO$	1618,75	129,50
— — entre 20 et 30°.	SO^3, $MnO+4HO$	1393,75	111,50
— chauffé à 120°.	SO^3, $MnO+HO$	1056,25	84,50
— — à 300°.	SO^3, MnO	943,75	75,50
Carbonate de manganèse.	CO^2, MnO	718,75	57,50
Mercure.	Hg	1250,00	100,00
Oxydule de mercure.	Hg^2O	2600,00	208,00
Protoxyde de mercure.	HgO	1350,00	108,00
Sous-sulfure de mercure.	Hg^2S	2700,00	216,00
Protosulfure de mercure (*cinabre, vermillon*).	HgS	1450,00	116,00
Sous-chlorure de mercure (*calomel*).	Hg^2Cl	2943,75	235,50
— avec le gaz ammoniac sec.	$Hg^2Cl+AzH^3$	3156,25	252,50
— avec l'ammoniaque liquide.	$Hg^2Cl+HgAzH^2$	4393,75	351,50
— avec le chlorure d'étain.	$Hg^2Cl+SnCl$	4125,00	330,00
Protochlorure de mercure (sublimé corrosif).	$HgCl$	1693,75	135,50
Oxychlorures de mercure.	$HgCl, 2HgO$	4393,75	351,50
	$HgCl, 3HgO$	5743,75	459,50
	$HgCl, 4HgO$	7093,75	567,50
Chloramidures de mercure.	$Hg^2ClAzH^2=HgCl, HgAzH^2$	3143,75	251,50
	$3HgCl, HgAzH^2$	6531,25	522,50
Sous-bromure de mercure.	Hg^2Br	3500,00	280,00
Protobromure de mercure.	$HgBr$	2250,00	180,00
Sous-iodure de mercure.	Hg^2I	4087,50	327,00
Protoiodure de mercure.	HgI	2837,50	227,00
Cyanure de mercure.	$HgCy=HgC^2Az$	1575,00	126,00
Cyanure double de mercure et de potassium.	$HgCy+KCy$	2387,50	191,00
Cyanure de mercure et bromure de potassium.	$HgCy+KBr$	3062,50	245,00
Azoture de mercure.	Hg^3Az	3925,00	314,00
Sulfate d'oxydule de mercure.	SO^3, Hg^2O	3100,00	248,00
Sulfate neutre de protoxyde de mercure.	SO^3, HgO	1850,00	148,00
Sulfate basique (*turbith minéral*).	SO^3, $3HgO$	4550,00	364,00
Azotate neutre d'oxydule de merc.	AzO^5, Hg^2O+2HO	3500,00	280,00
Azotate basique —	$2AzO^5$, $3Hg^2O+3HO$	9487,50	759,00
— bibasique —	AzO^5, $2Hg^2O$	5875,00	470,00
Mercure soluble d'Hahnemann.	AzO^5, (AzH^3+3Hg^2O)	8687,50	695,00

CORPS.	FORMULES CHIMIQUES.	ÉQUIVALENTS chimiques. Oxygène 100.	Hydrog. 1.
Azotate neutre de protoxyde de mercure.	$AzO^5,HgO+2HO$.	2250,00	180,00
Azotate basique de protoxyde de mercure.	$AzO^5, 2HgO+2HO$.	3600,00	288,00
Azotate tribasique.	$AzO^5, 3HgO+HO$.	4837,50	387,00
Chromates de protoxyde de mercure.	$CrO^3, 3HgO$.	4678,75	374,30
	$CrO^3, 4HgO$.	6028,75	482,30
Carbonate d'oxydule de mercure.	CO^2, Hg^2O.	2875,00	230,00
Carbonates de protoxyde de mercure (*).	$CO^2, 3HgO$.	4325,00	346,00
	$CO^2, 4HgO$.	5675,00	454,00
Molybdène.	Mo.	600,00	48,00
Protoxyde de molybdène.	MoO.	700,00	56,00
Bioxyde —	MoO^2.	800,00	64,00
Acide molybdique.	MoO^3.	900,00	72,00
Nickel.	Ni.	368,75	29,50
Protoxyde de nickel.	NiO.	468,75	37,50
Sesquioxyde —	Ni^2O^3.	1037,50	83,00
Chlorure —	NiCl.	812,50	65,00
Maillechort (alliage).	Cuivre, zinc et nickel.	»	»
Niobium.	Nb.	»	»
Or.	Au.	1227,50	98,20
Sous-oxyde d'or.	Au^2O.	2555,00	204,40
Sesquioxyde d'or (*acide aurique*).	Au^2O^3	2755,00	220,40
Aurate de potasse cristallisé.	$Au^2O^3, KO+6HO$.	4017,50	321,40
— d'ammoniaque.	$Au^2O^3, 2AzH^3+HO$.	3292,50	263,40
Auresulfite de potasse.	$Au^2O^3, KO+4(SO^2, KO)+5HO$.	7855,00	628,40
Pourpre de Cassius.	$Au^2O, 3(SnO^2)+4HO$.	5817,50	465,40
Sous-sulfure d'or.	Au^2S.	2655,00	212,40
Sesquisulfure d'or.	Au^2S^3.	3055,00	244,40
Sous-chlorure d'or.	Au^2Cl.	2898,75	231,90
Sesquichlorure d'or.	Au^2Cl^3.	3786,25	302,90
Sous-cyanure d'or.	Au^2Cy.	2780,00	222,40
Sesquicyanure d'or.	Au^2Cy^3.	3430,00	274,40
Cyanure double d'or et de potassium.	Au^2Cy^3, KCy.	4242,50	339,40
Osmium.	Os.	1243,75	99,50
Protoxyde d'osmium.	OsO.	1343,75	107,50
Sesquioxyde —	Os^2O^3.	2787,50	223,00
Bioxyde —	OsO^2	1443,75	115,50
Acide osmieux.	OsO^3.	1543,75	123,50
Acide osmique.	OsO^4.	1643,75	131,50
Protochlorure d'osmium.	OsCl.	1687,50	135,00
Bichlorure d'osmium.	$OsCl^2$.	2131,25	170,50
Chlorure double d'osmium et de potassium.	$OsCl^2+KCl$.	3062,50	245,00
Oxygène.	O.	100,00	8,00
Palladium.	Pd.	665,50	53,24
Protoxyde de palladium.	PdO.	765,50	61,24
Bioxyde —	PdO^2.	865,50	69,24
Protochlorure —	PdCl.	1109,25	88,74
Bichlorure —	$PdCl^2$.	1553,00	124,24
Chlorures doubles de palladium et de potassium	PdCl+KCl.	2040,50	163,24
	$PdCl^2+KCl$.	2484,25	198,74
Chlorure double de palladium et de chlorhydrate d'ammoniaque.	$PdCl+AzH^3, HCl$.	1778,00	142,24
Cyanure de palladium.	$PdCy{=}Pd, AzC^2$.	990,50	79,24

(*) Le *fulminate de mercure* est une combinaison de protoxyde de mercure avec l'acide *fulminique*, qui a pour formule $CyO{=}C^2AzO$.

CORPS.	FORMULES CHIMIQUES.	ÉQUIVALENTS chimiques. Oxygène 100.	Hydrog. 1.
Cyanures doubles de palladium et de potassium.	$PdCy+KCy+HO$	1915,50	153,24
	$PdCy+KCy+3HO$	2140,50	171,24
Pelopium	Pp	»	»
Phosphore	Ph	387,50	31,00
Acide hypophosphoreux	PhO	487,50	39,00
— hydraté	$PhO, 3HO$	825,00	66,00
Acide phosphoreux	PhO^3	687,50	55,00
— hydraté	$PhO^3, 3HO$	1025,00	82,00
Acide phosphorique	PhO^5	887,50	71,00
— monohydraté, ou acide métaphosphorique	PhO^5, HO	1000,00	80,00
— bihydraté, ou acide pyrophosphorique	$PhO^5, 2HO$	1112,50	89,00
— trihydraté, ou acide phosphorique ordinaire	$PhO^5, 3HO$	1225,00	98,00
Hydrogène phosphoré solide	Ph^2H	787,50	63,00
— liquide	PhH^2	412,50	33,00
— gazeux	PhH^3	425,00	34,00
Platine	Pt	1231,25	98,50
Protoxyde de platine	PtO	1331,25	106,50
Bioxyde de platine	PtO^2	1431,25	114,50
Hydrate de bioxyde (*acide platinique*)	»	»	»
Protosulfure de platine	PtS	1431,25	114,50
Bisulfure de platine	PtS^2	1631,25	130,50
Protochlorure de platine	$PtCl$	1675,00	134,00
Bichlorure de platine	$PtCl^2$	2118,75	169,50
Protochlorure de platine ammoniacal (*sel vert de Magnus*)	$PtCl, AzH^3$	1887,50	151,00
Autre protochlorure de platine ammoniacal	$PtCl, 2AzH^3+HO$	2212,50	177,00
Chlorures doubles de platine et de potassium	$PtCl, KCl$	2606,25	208,50
	$PtCl^2, KCl$	3050,00	244,00
Chlorures doubles de platine et d'ammoniaque	$PtCl+AzH^3, HCl$	2343,75	187,50
	$PtCl^2+AzH^3, HCl$	2787,50	223,00
Chlorure double de platine et de sodium	$PtCl^2+NaCl+6HO$	3525,00	282,00
Cyanure de platine	$PtCy=PtC^2Az$	1556,25	124,50
Cyanure double de platine et de potassium	$PtCy, KCy+3HO$	2706,25	216,50
Alliage défini de platine et d'étain	Pt^2Sn^3	4675,00	374,00
— de platine et de zinc	Pt^2Zn^3	3690,61	295,25
Plomb	Pb	1300,00	104,00
Sous-oxyde de plomb	Pb^2O	2700,00	216,00
Protoxyde de plomb (*litharge* ou *massicot*)	PbO	1400,00	112,00
Acide plombique	PbO^2	1500,00	120,00
Oxyde salin (*minium*)	$Pb^3O^4=2PbO+PbO^2$	4300,00	344,00
Plombate de potasse	$PbO^2, KO, 3HO$	2425,00	194,00
Sous-sulfure de plomb	Pb^2S	2800,00	224,00
Sulfure de plomb (*galène*)	PbS	1500,00	120,00
Chlorure de plomb	$PbCl$	1743,75	139,50
Oxychlorure de plomb (blanc)	$PbCl, PbO$ (*)	3143,75	251,50
Bromure de plomb	$PbBr$	2300,00	184,00
Iodure de plomb	PbI	2887,50	231,00

(*) La proportion d'oxyde de plomb varie jusqu'à 7PbO, et l'oxychlorure devient d'un beau jaune, en prenant les noms de *jaune minéral, jaune de Cassel* et *jaune de Turner*. Le jaune de Cassel a pour formule PbCl, 7Pbo.

CORPS.	FORMULES CHIMIQUES.	ÉQUIVALENTS chimiques. Oxygène 100.	Hydrog. 1.
Sulfate de plomb	SO^3, PbO	1900,00	152,00
Azotate de plomb	AzO^5, PbO	2075,00	166,00
Azotate de plomb bibasique	$AzO^5, 2PbO+HO$	3587,50	287,00
Azotite de plomb	AzO^3, PbO	1875,00	150,00
Azotite de plomb quadribasique	$AzO^3, 4PbO+HO$	6187,50	495,00
Combinaison d'azotite et d'azotate de plomb	$2(AzO^4, 2PbO+HO)$	6975,00	558,00
Phosphates de plomb	$PhO^5, 2PbO+HO$	3800,00	304,00
	$PhO^5, 3PbO$	5087,50	407,00
Minéral appelé *plomb phosphaté*	$3(PhO^5, 3PbO)+PbCl$	17006,25	1360,50
Chromate de plomb (*jaune de chrome*)	CrO^3, PbO	2028,75	162,30
Chromate de plomb bibasique	$CrO^3, 2PbO$	3428,75	274,30
Aluminate de plomb (*plomb-gomme*)	$2Al^2O^3, PbO+6HO$	3358,48	268,68
Acétate neutre de plomb	$C^4H^3O^3, PbO+3HO$	2375,00	190,00
Acétate sesquibasique de plomb	$2C^4H^3O^3, 3PbO,+HO$ (*)	5587,50	447,00
Acétate tribasique de plomb	$C^4H^3O^3, 3PbO+HO$ (*)	4950,00	396,00
Acétate sexbasique de plomb	$C^4H^3O^3, 6PbO$	9037,50	723,00
Carbonate de plomb (**)	CO^2, PbO	1675,00	134,00
Alliages de plomb (***)	»	»	»
Potassium	K	487,50	39,00
Protoxyde de potassium (*potasse*)	KO	587,50	47,00
Potasse	KO, HO	700,00	56,00
Potasse hydratée	$KO, 5HO$	1150,00	92,00
Peroxyde de potassium	KO^3	787,50	63,00
Chlorure —	KCl	931,25	74,50
Bromure —	KBr	1487,50	119,00
Iodure —	KI	2075,00	166,00
Fluorure —	KFl	725,00	58,00
Cyanure —	KCy	812,50	65,00
Sulfure —	$KS, KS^2, KS^3, KS^4, KS^5$	»	»
Azoture —	K^3Az	1637,50	131,00
Carbonate de potasse	CO^2, KO	862,50	69,00
— — cristallisé	$CO^2, KO+2HO$	1087,50	87,00
Sulfate neutre de potasse	SO^3, KO	1087,50	87,00
Bisulfate de potasse	$2SO^3, KO$	1587,50	127,00
— — hydraté	$2SO^3, KO, HO$	1700,00	136,00
Sulfite neutre de potasse	SO^2, KO	987,50	79,00
— — cristallisé	$SO^2, KO+2HO$	1212,50	97,00
Bisulfite de potasse	$2SO^2, KO$	1387,50	111,00
Silicate de potasse (verre soluble)	»	»	»
Azotate de potasse (nitre ou salpêtre)	AzO^5, KO	1262,50	101,00

POUDRES DE	guerre.	chasse.	mine.	traite.
Nitre	75,0	80	62	62
Charbon	12,5	14	18	20
Soufre	12,5	10	20	18
	100,0	104	100	100

CORPS.	FORMULES CHIMIQUES.	Oxygène 100.	Hydrog. 1.
Azotite de potasse	AzO^3, KO	1062,50	85,00

(*) *L'extrait de saturne* des pharmaciens, ou l'*eau blanche*, peut être considéré comme une dissolution d'un mélange d'acétate sesquibasique et d'acétate tribasique de plomb.

(**) Le carbonate de plomb du commerce (*céruse, blanc de plomb, blanc d'argent*) est un carbonate basique de plomb, de composition variable ordinairement comprise entre les deux formules $2(CO^2, PbO)+PbO, HO$ et $3(CO^2, PbO)+PbO, HO$.

(***) La soudure des plombiers renferme 2 parties de plomb pour 1 d'étain. L'alliage le plus usité des potiers d'étain renferme 12 à 18 pour 100 de plomb. L'alliage de Darcet, fusible au-dessous de 100°, contient 8 parties de bismuth, 5 de plomb et 3 d'étain. Un peu de mercure augmente encore la fusibilité.

CORPS.	FORMULES CHIMIQUES.	ÉQUIVALENTS chimiques. Oxygène 100.	Hydrog. 1.
Nitrosulfate de potasse.	SO^2, AzO^2, KO.	1362,50	109,00
Acides sulfazotés, obtenus par un courant d'acide sulfureux à travers une dissolution concentrée d'azotite de potasse. Les 3e, 4e, 5e et 8e ont seuls été isolés.	$SAzH^3O^8$.	1212,50	97,00
	$S^2AzH^3O^{10}$.	1512,50	121,00
	$S^3AzH^3O^{12}$.	1812,50	145,00
	$S^4AzH^3O^{14}$.	2112,50	169,00
	$S^5AzH^3O^{16}$.	2412,50	193,00
	$S^6AzH^3O^{18}$.	2712,50	217,00
	$S^7AzH^3O^{20}$.	3012,50	241,00
	$S^8AzH^3O^{22}$.	3312,50	265,00
Chlorate de potasse.	ClO^5, KO.	1531,25	122,50
Hypochlorite de potasse (eau de Javelle).	ClO, KO.	1131,25	90,50
Cyanate de potasse.	CyO, KO.	1012,50	81,00
Rhodium.	Rh.	652,00	52,16
Protoxyde de rhodium.	RhO.	752,00	60,16
Sesquioxyde. —	Rh^2O^3.	1604,00	128,32
Protochlorure —	$RhCl$.	1095,75	87,66
Sesquichlorure —	Rh^2Cl^3.	2635,25	210,82
Chlorure double de rhodium et de sodium.	$Rh^2Cl^3+3NaCl+18HO$.	6854,00	548,32
Sesquisulfure de rhodium.	Rh^2S^3.	1904,00	152,32
Rubidium.	Rb.	1066,25	85,30
Ruthénium.	Ru.	652,00	52,16
Sélénium.	Se.	496,88	39,75
Acide sélénieux.	SeO^2.	696,88	55,75
— sélénique.	SeO^3.	796,88	63,75
Hydrogène sélénié.	HSe.	509,38	40,75
Silicium.	Si.	262,50	21,00
Sesquioxyde de silicium.	$Si^2O^3, 2HO$.	1050,00	84,00
Acide silicique (*silice* ou *quartz et silex*).	SiO^3.	562,50	45,00
Acide silicique hydraté.	$2SiO^3, HO$.	1237,50	99,00
	SiO^3, HO.	675,00	54,00
	$2SiO^3, 3HO$.	1462,50	117,00
Hydrogène silicié.	SiH^2.	287,50	23,00
Chlorure de silicium.	$SiCl^3$.	1593,75	127,50
Fluorure de silicium.	$SiFl^3$.	975,00	78,00
Acide hydrofluosilicique.	$3HFl, 2SiFl^3$.	2700,00	216,00
Chlorhydrate de sesquichlorure de silicium.	$Si^2Cl^3, 2HCl$.	2768,75	221,50
Bromure de silicium.	$SiBr^3$.	3262,50	261,00
Bromhydrate de sesquibromure de silicium.	$Si^2Br^3, 2HBr$.	5550,00	444,00
Iodhydrate de sesquiiodure de silicium.	$Si^2I^3, 2HI$.	8487,50	679,00
Sulfure de silicium.	SiS^3.	862,50	69,00
Sodium.	Na.	287,50	23,00
Protoxyde de sodium (*soude*).	NaO.	387,50	31,00
Soude.	NaO, HO.	500,00	40,00
Peroxyde de sodium.	NaO^3.	587,50	47,00
Chlorure de sodium (*sel marin*).	$NaCl$.	731,25	58,50
— — hydraté.	$NaCl+4HO$.	1181,25	94,50
Carbonate de soude.	CO^2, NaO.	662,50	53,00
— cristallisé (*du commerce*).	$CO^2, NaO+10HO$.	1787,50	143,00
bicarbonate de soude cristallisé.	$2CO^2, NaO+HO$.	1050,00	84,00
Sesquicarbonate de soude (*natron*).	$3CO^2, 2NaO+4HO$.	2050,00	164,00
Borate de soude (*borax*).	$2BoO^3, NaO+10HO$.	2384,75	190,78
	$2BoO^3, NaO+5HO$.	1822,25	145,78
Silicate de soude (*verre*).	»	»	»

CORPS.	FORMULES CHIMIQUES.	ÉQUIVALENTS chimiques. Oxygène. 100.	Hydrog. 1.
Dosage employé communément dans la fabrication du *verre à glaces*.	Sable très blanc. 300	»	»
	Carbonate de soude sec. . . 100	»	»
	Chaux éteinte à l'air. . . . 43	»	»
	Calcin ou rognures. 300	»	»
Dosage donnant le *verre à bouteilles*.	Sable ocreux. 100	»	»
	Soude de varech. . . . 40 à 60	»	»
	Cendres non lessivées. 30 à 40	»	»
	Cendres lessivées. . . 150 à 180	»	»
	Argile ocreuse. . . . . 80 à 100	»	»
	Calcin (fragments). . . 100 à 150	»	»
Proportions le plus généralement employées pour le *cristal*. . . .	Sable pur. 300	»	»
	Minium. 200	»	»
	Carbonate de potasse purifié. 100	»	»
Crown-glass.	Verre ordinaire à base de chaux.	»	»
Flint-glass.	Véritable cristal.	»	»
Strass.	Variété de cristal coloré par divers oxydes métalliques. . . .	»	»
Émail.	Cristal rendu opaque par certains oxydes, et notamment l'acide stannique.	»	»
Sulfate neutre de soude cristallisé (*sel de Glauber*).	$SO^3, NaO+10HO$.	2012,50	161,00
Bisulfate de soude.	$2SO^3, NaO+3HO$.	1725,00	138,00
— — anhydre.	$2SO^3, NaO$.	1387,50	111,00
Hyposulfite de soude.	$S^2O^2, NaO+5HO$.	1550,00	124,00
Phosphate de soude cristallisé. . .	$PhO^5(2NaO, HO)+24HO$.	4475,00	358,00
— — chauffé à 200°.	$PhO^5(2NaO, HO)$.	1775,00	142,00
— — calciné.	$PhO^5, 2NaO$.	1662,50	133,00
Pyrophosphate de soude.	$PhO^5, 2NaO+10HO$.	2787,50	223,00
Métaphosphate de soude.	$PhO^5, NaO+4HO$.	1725,00	138,00
— — chauffé à 200°.	$PhO^5(NaO, HO)$.	1387,50	111,00
— — calciné.	PhO^5, NaO.	1275,00	102,00
Autre phosphate de soude.	$PhO^5, 3NaO$.	2050,00	164,00
Azotate de soude.	AzO^5, NaO.	1062,50	85,00
Soufre.	S.	200,00	16,00
Acide hyposulfureux.	S^2O^2.	600,00	48,00
Acide sulfureux.	SO^2.	400,00	32,00
— — hydraté.	SO^2, HO ou $9HO$ ou $14HO$. . . .	»	»
Acide hyposulfurique concentré. .	S^2O^5, HO.	1012,50	81,00
— — monosulfuré ou trithionique. . .	S^3O^5.	1100,00	88,00
— — bisulfuré ou tétrathionique. .	S^4O^5.	1300,00	104,00
— — trisulfuré ou pentathionique. . .	S^5O^5.	1500,00	120,00
Acide sulfurique.	SO^3.	500,00	40,00
— — monohydraté (*huile de vitriol*).	SO^3, HO.	612,50	49,00
— — bihydraté.	$SO^3, 2HO$.	725,00	58,00
— — trihydraté.	$SO^3, 3HO$.	837,50	67,00
Autre hydrate.	$2SO^3, HO$.	1112,50	89,00
Acide sulfurique fumant (*de Nordhausen*).	$3SO^3, 2HO=SO^3+2(SO^3, HO)$. .	1725,00	138,00
Acide chlorosulfurique.	SO^2Cl.	843,75	67,50
— iodosulfurique.	SO^2I.	1987,50	159,00
— sulfhydrique.	HS.	212,50	17,00
Bisulfure d'hydrogène.	HS^2.	412,50	33,00
Protosulfure de phosphore.	PhS.	587,50	47,00
Trisulfure —	PhS^3.	987,50	79,00

CORPS.	FORMULES CHIMIQUES.	ÉQUIVALENTS chimiques. Oxygène 100.	Hydrog. 1.
Pentasulfure de phosphore.	PhS^5.	1387,50	111,00
Bisulfure d'arsenic (*réalgar*).	AsS^2.	1337,50	107,00
Trisulfure d'arsenic (*orpiment*).	AsS^3.	1537,50	123,00
Pentasulfure d'arsenic.	AsS^5.	1937,50	155,00
Strontium (*).	Sr.	550,00	44,00
Protoxyde de strontium (*strontiane*)	SrO.	650,00	52,00
Strontiane.	SrO, HO.	762,50	61,00
Strontiane cristallisé.	SrO+8HO.	1550,00	124,00
Bioxyde de strontium.	SrO^2.	750,00	60,00
Tantale.	Ta.	1153,62	92,29
Protoxyde de tantale.	TaO.	1253,62	100,29
Sesquioxyde —	Ta^2O^5.	2607,24	208,58
Tellure.	Te.	806,25	64,50
Acide tellureux.	TeO^2.	1006,25	80,50
— tellurique.	TeO^3.	1106,25	88,50
Hydrogène telluré.	HTe.	818,75	65,50
Terbium.	Tr.	»	»
Thallium.	Tl.	2550,00	204,00
Thorium.	Th.	743,75	59,50
Oxyde de thorium.	ThO.	843,75	67,50
Titane.	Ti.	313,75	25,10
Acide titanique.	TiO^2.	513,75	41,10
Chlorure de titane.	$TiCl^2$.	1201,25	96,10
Tungstène ou **wolfram**.	W.	1150,00	92,00
Oxyde de tungstène.	WO^2.	1350,00	108,00
Acide tungstique.	WO^3.	1450,00	116,00
Uranium.	U.	750,00	60,00
Protoxyde d'uranium.	UO.	850,00	68,00
Uranyle ou *urane*.	U^2O^2.	1700,00	136,00
Oxyde vert olive d'uranium.	$U^3O^4=UO+U^2O^3$.	2650,00	212,00
Sesquioxyde —	U^2O^3.	1800,00	144,00
Protochlorure —	UCl.	1193,75	95,50
Sous-chlorure —	U^4Cl^3.	4331,25	346,50
Chlorure d'uranyle.	U^2O^2Cl.	2143,75	171,50
Chlorure double d'uranyle et de potassium.	U^2O^2Cl, KCl, 2HO.	3300,00	264,00
Chlorure double d'uranyle et d'ammonium.	U^2O^2Cl, AzH^4Cl, 2HO.	3037,50	243,00
Azotate de sesquioxyde d'uranium.	AzO^5, U^2O^3, 6HO.	3150,00	252,00
Azotate d'uranyle.	AzO^5, $(U^2O^2)O$, 6HO.	3150,00	252,00
Sulfate neutre d'uranyle.	SO^3, $(U^2O^2)O$, 3HO.	2637,50	211,00
Bisulfate d'uranyle.	$2SO^3$, $(U^2O^2)O$, HO.	2912,50	233,00
Sulfate d'uranyle et de potasse.	SO^3, $(U^2O^2)O$, SO^3, KO, 2HO.	3612,50	289,00
Oxalate d'uranyle.	C^2O^3, $(U^2O^2)O$, 3HO.	3587,50	207,00
Oxalate d'uranyle et de potasse.	C^2O^3, $(U^2O^2)O$, C^2O^3, KO, 3HO.	3625,00	290,50
Tartrate d'uranyle.	$C^8H^6O^{12}$, $2(U^2O^2)O$, 6HO.	6150,00	492,50
Émétique uranique, ou tartrate double d'uranyle et d'antimoine (desséché à 200°).	$C^8H^2O^8$, $(U^2O^2)O$, Sb^2O^3 (**).	6575,00	526,00
Uranite d'Autun.	PhO^5, $2(U^2O^2)O$, CaO, 8HO.	5737,50	459,00
Oxalate de protoxyde d'uranium.	C^2O^3, UO, 3HO.	1637,50	131,00
Vanadium.	Vn.	855,75	68,46
Oxyde de vanadium.	VnO.	955,75	76,46
Acide vanadeux.	VnO^2.	1055,75	84,46
— vanadique.	VnO^3.	1155,75	92,46

(*) Le sulfure et le chlorure de strontium correspondent à ceux de barium, et la strontiane donne une série de combinaisons isomorphes de celles de la baryte.

(**) Correspond à l'émétique ordinaire desséché à 200°, $C^8H^2O^8$, KO, Sb^2O^3.

CORPS.	FORMULES CHIMIQUES.	ÉQUIVALENTS chimiques. Oxygène 100.	Hydrog. 1.
Yttrium.	Y.	402,31	32,18
Oxyde d'yttrium (*yttria*).	YO.	502,31	40,18
Zinc.	Zn.	409,37	32,75
Oxyde de zinc.	ZnO.	509,37	40,75
— hydraté.	ZnO, HO.	621,87	49,75
Chlorure de zinc.	ZnCl.	853,12	68,25
Bromure de zinc.	ZnBr.	1409,37	112,75
Iodure de zinc.	ZnI.	1996,87	159,75
Sulfure de zinc.	ZnS.	609,37	48,75
Phosphure de zinc.	$Zn^{3}Ph$.	1615,61	129,25
Sulfate de zinc (*vitriol blanc*).	SO^{3}, ZnO+7HO.	1796,87	143,75
Sous-sulfate de zinc.	SO^{3}, 3ZnO.	2028,11	162,25
Sulfate double de zinc et de potasse.	SO^{3}, ZnO+SO^{3}, KO+6HO.	2771,87	221,75
Sulfate double de zinc et d'ammoniaque.	SO^{3}, ZnO+SO^{3}, $AzH^{4}O$+6HO.	2509,37	200,75
Carbonate de zinc (*calamine*).	CO^{2}, ZnO.	784,37	62,75
Hydrocarbonate de zinc.	(2ZnO, CO^{2}+3ZnO, HO).	2934,35	234,75
Zirconium.	Zr.	419,73	33,58
Sesquioxyde de zirconium (*zircone*).	$Zr^{2}O^{3}$.	1139,46	91,16
	2° CHIMIE ORGANIQUE.		
Cellulose.	$C^{12}H^{10}O^{10}$.	2025,00	162,00
— trinitrique (*poudre-coton*).	$C^{24}H^{17}O^{17}$, $3AzO^{5}$.	5737,50	459,00
— tétranitrique —	$C^{24}H^{16}O^{16}$, $4AzO^{5}$.	6300,00	504,00
— pentanitrique —	$C^{24}H^{15}O^{15}$, $5AzO^{5}$.	6862,50	549,00
Amidon.	$C^{12}H^{9}O^{9}$, HO.	2025,00	162,00
— ou fécule conservé dans des magasins secs.	$C^{12}H^{9}O^{9}$, HO+4HO.	2475,00	198,00
Fécule chauffée à 200° (*dextrine*).	$C^{12}H^{9}O^{9}$, HO.	2025,00	162,00
Principes gélatineux des fruits. Pectose.	Inconnue.	»	»
Pectine. Parapectine. Métapectine.	$C^{64}H^{40}O^{56}$, 8HO.	11800,00	944,00
Acide pectosique.	$C^{32}H^{20}O^{28}$, 3HO.	5787,50	463,00
Acide pectique.	$C^{32}H^{20}O^{28}$, 2HO.	5675,00	454,00
Acide parapectique.	$C^{24}H^{15}O^{21}$, 2HO.	4312,50	345,00
Acide métapectique.	$C^{7}H^{5}O^{7}$, 2HO.	1512,50	121,00
Matières sucrées			
Sucre de canne.	$C^{12}H^{11}O^{11}$.	2137,50	171,00
Caramel.	$C^{12}H^{9}O^{9}$.	1912,50	153,00
Sucrate de chaux.	$C^{12}H^{11}O^{11}$, CaO.	2487,50	199,00
— de baryte.	$C^{12}H^{11}O^{11}$, BaO.	3093,75	247,50
— de plomb.	$C^{12}H^{10}O^{10}$, 2PbO.	4825,00	386,00
Mélitose cristallisé.	$C^{24}H^{24}O^{24}$+4HO.	4950,00	396,00
Micose et tréhalose.	$C^{12}H^{11}O^{11}$.	2137,50	171,00
Mélézitose.	$C^{12}H^{11}O^{11}$.	2137,50	171,00
Glucose ou sucre de raisin.	$C^{12}H^{12}O^{12}$, 2HO.	2475,00	198,00
Lactose ou sucre de lait.	$C^{12}H^{12}O^{12}$.	2250,00	180,00
Eucalyne et sorbine.	$C^{12}H^{12}O^{12}$.	2250,00	180,00
Mannite.	$C^{12}H^{14}O^{12}$.	2275,00	182,00
Dulcose ou dulcite. Phycite.	$C^{12}H^{14}O^{12}$.	2275,00	182,00
Quercite. Pinite.	$C^{12}H^{12}O^{10}$.	2050,00	164,00

CORPS.	FORMULES CHIMIQUES.	ÉQUIVALENTS chimiques.	
		Oxygène 100.	Hydrog. 1.
Glucosides.			
Salicine	$C^{26}H^{18}O^{14}$	3575,00	286,00
Saligénine	$C^{14}H^{8}O^{4}$	1550,00	124,00
Salirétine	$C^{28}H^{12}O^{4}$	2650,00	212,00
Hélicine	$C^{26}H^{16}O^{14}$	3550,00	284,00
Populine	$C^{40}H^{22}O^{16}$	4875,00	390,00
Phlorizine	$C^{42}H^{24}O^{20}$	5450,00	436,00
Arbutine	$C^{36}H^{22}O^{20}$	4975,00	398,00
Arctuvine	$C^{24}H^{10}O^{8}$	2725,00	218,00
Esculine	$C^{42}H^{24}O^{26}$	6050,00	484,00
Esculétine	$C^{18}H^{6}O^{8}$	2225,00	178,00
Orcine	$C^{14}H^{6}O^{4}$	1525,00	122,00
Orcéine	$C^{14}H^{7}AzO^{6}$	1912,50	153,00
Alcools. Ethers.			
Alcool	$C^{4}H^{6}O^{2}$	575,00	46,00
Aldéhyde	$C^{4}H^{4}O^{2}$	550,00	44,00
Hydrate d'alcool défini	$C^{4}H^{6}O^{2}+6HO$	1250,00	100,00
Acide sulfovinique	$2SO^{3}, C^{4}H^{5}O, HO$	1575,00	126,00
Ether	$C^{8}H^{10}O^{2}=2(C^{4}H^{5}O)$	925,00	74,00
— chlorhydrique (chlorure d'éthyle)	$C^{4}H^{5}Cl$	806,25	64,50
— bromhydrique (bromure —)	$C^{4}H^{5}Br$	1362,50	109,00
— iodhydrique (iodure —)	$C^{4}H^{5}I$	1950,00	156,00
— cyanhydrique (cyanure —)	$C^{4}H^{5}C^{2}Az$	687,50	55,00
— sulfhydrique (sulfure —)	$C^{4}H^{5}S$	562,50	45,00
Sulfhydrate de sulfure d'éthyle ou mercaptan éthylique	$C^{4}H^{5}S, HS$	775,00	62,00
Bisulfure d'éthyle	$C^{4}H^{5}S^{2}$	762,50	61,00
Ether sélénhydrique (séléniure d'éthyle)	$C^{4}H^{5}Se$	859,38	68,75
— tellurhydrique (tellurure —)	$C^{4}H^{5}Te$	1168,75	93,50
— azoteux (azotite —)	$AzO^{3}, C^{4}H^{5}O$	937,50	75,00
— azotique (azotate —)	$AzO^{5}, C^{4}H^{5}O$	1137,50	91,00
— sulfureux (sulfite —)	$SO^{2}, C^{4}H^{5}O$	862,50	69,00
— sulfurique (sulfate —)	$SO^{3}, C^{4}H^{5}O$	962,50	77,00
— phosphatique (phosphate —)	$C^{4}H^{7}PhO^{8}=PhO^{5}, C^{4}H^{5}O, 2HO$	1575,00	126,00
— borique (borate —)	$BoO^{3}, 3C^{4}H^{5}O$	1823,62	145,89
	$2BoO^{3}, C^{4}H^{5}O$	1334,74	106,78
— silicique (silicate —)	$SiO^{3}, 3C^{4}H^{5}O$	1950,00	156,00
	$2SiO^{3}, 3C^{4}H^{5}O$	2512,50	201,00
	$4SiO^{3}, 3C^{4}H^{5}O$	3637,50	291,00
Acide carbovinique	$2CO^{2}, C^{4}H^{5}O$	1012,50	81,00
Ether carbonique (carbonate d'éthyle)	$CO^{2}, C^{4}H^{5}O$	737,50	59,00
— carbamique	$C^{6}H^{7}AzO^{4}=C^{2}H^{2}AzO^{3}, C^{4}H^{5}O$	1112,50	89,00
Acide sulfocarbovinique ou xanthique	$C^{6}H^{6}O^{2}S^{4}=C^{2}S^{4}, C^{4}H^{5}O, HO$	1525,00	122,00
Ether bioxysulfocarbonique (bioxysulfocarbonate d'éthyle)	$C^{12}H^{10}O^{4}S^{8}=C^{4}S^{8}O^{2}, 2(C^{4}H^{5}O$	3025,00	242,00
— sulfocarbonique (sulfocarbonate d'éthyle)	$C^{10}H^{10}O^{4}S^{2}=C^{2}O^{4}(C^{4}H^{5}S)^{2}$	1675,00	134,00
— disulfocarbonique (disulfocarbonate d'éthyle)	$C^{10}H^{10}O^{2}S^{4}=C^{2}S^{4}, 2C^{4}H^{5}O$	1875,00	150,00
Xanthogénamide ou uréthane sulfurée	$C^{6}H^{7}AzO^{2}S^{2}$	1312,50	105,00
Mercaptan	$C^{4}H^{6}S^{2}$	775,00	62,00
Ether cyanique (cyanate d'éthyle)	$C^{6}H^{5}AzO^{2}=C^{2}AzO, C^{4}H^{5}O$	887,50	71,00
— cyanurique (cyanurate —)	$C^{18}H^{15}Az^{3}O^{6}=C^{6}Az^{3}O^{3}, 3C^{4}H^{5}O$	2662,50	213,00

CORPS.	FORMULES CHIMIQUES.	ÉQUIVALENTS chimiques. Oxygène 100.	ÉQUIVALENTS chimiques. Hydrog. 1.
Ether formique (formiate d'éthyle).	$C^{6}H^{6}O^{4}=C^{2}HO^{3}, C^{4}H^{5}O$	925,00	74,00
— acétique (acétate —).	$C^{8}H^{8}O^{4}=C^{4}H^{3}O^{3}, C^{4}H^{5}O$	1100,00	88,00
— butyrique (butyrate —).	$C^{12}H^{12}O^{4}=C^{8}H^{7}O^{3}, C^{4}H^{5}O$	1450,00	116,00
— benzoïque (benzoate —).	$C^{18}H^{10}O^{4}=C^{14}H^{5}O^{3}, C^{4}H^{5}O$	1875,00	150,00
— cuminique (cuminate —).	$C^{24}H^{16}O^{4}=C^{20}H^{11}O^{3}, C^{4}H^{5}O$	2400,00	192,00
— salicylique (salicylate —).	$C^{18}H^{10}O^{6}=C^{14}H^{5}O^{5}, C^{4}H^{5}O$	2075,00	166,00
— oxalique (oxalate —).	$C^{12}H^{10}O^{4}=C^{4}O^{6}, 2C^{4}H^{5}O$	1425,00	114,00
— succinique (succinate —).	$C^{16}H^{14}O^{8}=C^{12}H^{9}O^{7}, C^{4}H^{5}O$	2175,00	174,00
Alcool méthylique (esprit de bois).	$C^{2}H^{4}O^{2}$	400,00	32,00
Oxyde de méthyle.	$C^{2}H^{3}O$	287,50	23,00
Fluorure de méthyle.	$C^{2}H^{3}Fl$	425,00	34,00
Chlorure de méthyle.	$C^{2}H^{3}Cl$	631,25	50,50
Chlorure de méthyle monochloré.	$C^{2}H^{2}Cl^{2}$	1062,50	85,00
Chlorure de méthyle bichloré (*chloroforme*).	$C^{2}HCl^{3}$	1493,75	119,50
Chlorure de méthyle trichloré (chlorure de carbone).	$C^{2}Cl^{4}$	1925,00	154,00
Bromure de méthyle.	$C^{2}H^{3}Br$	1187,50	95,00
Bromoforme.	$C^{2}HBr^{3}$	3162,50	253,00
Iodure de méthyle.	$C^{2}H^{3}I$	1775,00	142,00
Zinc-méthyle.	$C^{2}H^{3}Zn$	596,87	47,75
Stanméthyle.	$C^{2}H^{3}Sn$	925,00	74,00
Mercuro-méthyle.	$C^{2}H^{3}Hg$	1437,50	115,00
Iodoforme.	$C^{2}HI^{3}$	4925,00	394,00
Cyanure de méthyle.	$C^{4}H^{3}Az=C^{2}Az, C^{2}H^{3}$	512,50	41,00
Azotate —	$AzO^{5}, C^{2}H^{3}O$	962,50	77,00
Azotite —	$AzO^{3}, C^{2}H^{3}O$	762,50	61,00
Acide méthylsulfureux.	$C^{2}H^{4}S^{2}O^{6}=2SO^{2}, C^{2}H^{3}O, HO$	1200,00	96,00
— sulfométhylique.	$C^{2}H^{4}S^{2}O^{8}=2SO^{3}, C^{2}H^{3}O, HO$	1400,00	112,00
Sulfate de méthyle.	$SO^{3}, C^{2}H^{3}O$	787,50	63,00
Cyanate —	$C^{4}H^{3}AzO^{2}$	712,50	57,00
Borate —	$BoO^{3}, 3C^{2}H^{3}O$	1298,62	103,89
	$2BoO^{3}, C^{2}H^{3}O$	1159,74	92,78
Silicate —	$SiO^{3}, 3C^{2}H^{3}O$	1425,00	114,00
	$2SiO^{3}, C^{2}H^{3}O$	1412,50	113,00
Cyanurate —	$C^{12}H^{9}Az^{3}O^{6}=C^{6}Az^{3}O^{3}, 3C^{2}H^{3}O$	2137,50	171,00
Formiate —	$C^{2}HO^{3}, C^{2}H^{3}O$	750,00	60,00
Acétate —	$C^{4}H^{3}O^{3}, C^{2}H^{3}O$	925,00	74,00
Butyrate —	$C^{8}H^{7}O^{3}, C^{2}H^{3}O$	1275,00	102,00
Valérate —	$C^{10}H^{9}O^{3}, C^{2}H^{3}O$	1450,00	116,00
Caproate —	$C^{12}H^{11}O^{3}, C^{2}H^{3}O$	1625,00	130,00
Caprylate —	$C^{16}H^{15}O^{3}, C^{2}H^{3}O^{3}$	1975,00	158,00
Benzoate —	$C^{16}H^{8}O^{4}=C^{14}H^{5}O^{3}, C^{2}H^{3}O$	1700,00	136,00
Salicylate —	$C^{16}H^{8}O^{6}=C^{14}H^{5}O^{5}, C^{2}H^{3}O$	1900,00	152,00
Oxalate —	$C^{4}O^{6}, 2C^{2}H^{3}O$	1475,00	118,00
Chlorocarbonate de méthyle.	$C^{2}ClO^{3}, C^{2}H^{3}O$	1181,25	94,50
Alcool propylique.	$C^{6}H^{8}O^{2}$	750,00	60,00
Chlorure de propyle.	$C^{6}H^{7}Cl$	1056,25	84,50
Acétate —	$C^{6}H^{7}O, C^{4}H^{3}O^{3}$	1275,00	102,00
Butyrate —	$C^{6}H^{7}O, C^{8}H^{7}O^{3}$	1625,00	130,00
Benzoate —	$C^{6}H^{7}O, C^{14}H^{5}O^{3}$	2050,00	164,00
Acide sulfopropylique.	$C^{6}H^{7}O, 2SO^{3}, HO$	1862,50	149,00
Sulfopropylate de baryte.	$C^{6}H^{7}O, 2SO^{3}BaO+2HO$	3775,00	302,00
Acide propionique.	$C^{6}H^{5}O^{3}, HO$	925,00	74,00
Alcool butylique.	$C^{8}H^{10}O^{2}$	925,00	74,00
Ether butylique.	$C^{16}H^{20}O^{2}$	1650,00	132,00
Chlorure de butyle.	$C^{8}H^{9}Cl$	1156,25	92,50
Bromure —	$C^{8}H^{9}Br$	1712,50	137,00

CORPS.	FORMULES CHIMIQUES.	ÉQUIVALENTS chimiques. Oxygène 100.	Hydrog. 1.
Iodure de butyle.	C^8H^9I.	2300,00	184,00
Cyanure —	C^8H^9Cy.	1037,50	83,00
Acétate —	$C^8H^9O, C^4H^3O^3$.	1450,00	116,00
Butyrate —	$C^8H^9O, C^8H^7O^3$.	1800,00	144,00
Acide sulfobutylique.	$C^8H^9O, 2SO^3, HO$.	1925,00	154,00
Alcool amylique (huile de pomme de terre).	$C^{10}H^{12}O^2$.	1100,00	88,00
Oxyde d'amyle.	$C^{20}H^{22}O^2$.	1975,00	158,00
Chlorure —	$C^{10}H^{11}Cl$.	1331,25	106,50
Bromure —	$C^{10}H^{11}Br$.	1887,50	151,00
Iodure —	$C^{10}H^{11}I$.	2475,00	198,00
Sulfure —	$C^{20}H^{22}S^2$.	2175,00	174,00
Mercaptan amylique.	$C^{10}H^{12}S^2$.	1300,00	104,00
Azotite d'amyle.	$C^{10}H^{11}O, AzO^3$.	1462,50	117,00
Azotate —	$C^{10}H^{11}O, AzO^5$.	1662,50	133,00
Borate —	$3C^{10}H^{11}O, BoO^3$.	3398,62	271,89
Acétate —	$C^{10}H^{11}O, C^4H^3O^3$.	1625,00	130,00
Butyrate —	$C^{10}H^{11}O, C^8H^7O^3$.	1975,00	158,00
Valérate —	$C^{10}H^{11}O, C^{10}H^9O^3$.	2150,00	172,00
Caproate —	$C^{10}H^{11}O, C^{12}H^{11}O^3$.	2325,00	186,00
Oxalate —	$C^{20}H^{22}O^2, C^4O^6$.	2875,00	230,00
Acide sulfamylique.	$C^{10}H^{11}O, 2SO^3, HO$.	2100,00	168,00
Acide amylphosphoreux.	$(C^{10}H^{11}O, 2HO), PhO^3$.	1900,00	152,00
Acide xantamylique.	$C^{10}H^{11}O, 2CS^2, HO$.	1900,00	152,00
Alcool caprylique.	$C^{16}H^{18}O^2$.	1625,00	130,00
Alcool cétique (éthal).	$C^{32}H^{34}O^2$.	3025,00	242,00
Alcool cérylique.	$C^{54}H^{56}O^2$.	4950,00	396,00
Alcool mélissique.	$C^{60}H^{62}O^2$.	5475,00	438,00
Alcoolides.			
Alcool acétylique.	$C^4H^4O^2$.	550,00	44,00
— allylique.	$C^6H^8O^2$.	750,00	60,00
Ether —	$C^{12}H^{10}O^2$.	1225,00	98,00
— éthylallylique.	$C^6H^5O^2$. (C^4H^5).	»	»
Chlorure d'allyle.	C^6H^5Cl.	956,25	76,50
Bromure —	C^6H^5Br.	1512,50	121,00
Iodure —	C^6H^5I.	2100,00	168,00
Sulfure — (essence d'ail).	$C^{12}H^{10}S^2$.	1425,00	114,00
Sulfhydrate de sulfure d'allyle (mercaptan allylique).	C^6H^5S, HS.	925,00	74,00
Sulfocianure d'allyle (essence de moutarde).	C^6H^5S, C^2AzS.	1237,50	99,00
Cyanate d'allyle.	C^6H^5O, C^2AzO.	1037,50	83,00
Carbonate —	C^6H^5O,CO^2.	887,50	71,00
Acétate —	$C^6H^5O, C^4H^3O^3$.	1250,00	100,00
Butyrate —	$C^6H^5O, C^8H^7O^3$.	1600,00	128,00
Benzoate —	$C^6H^5O, C^{14}H^5O^3$.	2025,00	162,00
Oxalate —	C^6H^5O, C^2O^3.	1062,50	85,00
Acide sulfo-allylique.	$C^6H^5O, 2SO^3, HO$.	1725,00	138,00
Aldéhyde allylique (acroléine).	$C^6H^4O^2$.	700,00	56,00
Allylène (pyroplène).	C^6H^6.	525,00	42,00
Azoture d'allyle (allylamine).	C^6H^7Az.	712,50	57,00
Urée allylique.	$C^8H^8Az^2O^2$.	1250,00	100,00
Diallylurée (sinapoline).	$C^{14}H^{12}Az^2O^2$.	1750,00	140,00
Urée allylique sulfurée (thiosinnamine).	$C^8H^8Az^2S^2$.	1450,00	116,00
Alcool angélique.	$C^{10}H^{10}O^2$	1075,00	86,00

CORPS.	FORMULES CHIMIQUES.	ÉQUIVALENTS chimiques. Oxygène 100.	ÉQUIVALENTS chimiques. Hydrog. 1.
Alcool menthique (camphre de menthe)	$C^{20}H^{20}O^2$	1950,00	156,00
Menthène	$C^{20}H^{18}$	1725,00	138,00
Bornéol (camphre de Bornéo)	$C^{20}H^{18}O^2$	1925,00	154,00
Alcool benzoïque	$C^{14}H^8O^2$	1350,00	108,00
Ether chlorhydrobenzoïque	$C^{14}H^7Cl$	1581,25	126,50
— cyanhydrobenzoïque	$C^{16}H^7Az = C^2Az, C^{14}H^7$	1462,50	117,00
— acétobenzoique	$C^{18}H^{10}O^4 = C^4H^3O^3, C^{14}H^7O$	1875,00	150,00
Alcool cuminique	$C^{20}H^{14}O^2$	1875,00	150,00
— *anisique*	$C^{16}H^{10}O^4$	1725,00	138,00
Aldéhydes			
Aldéhyde vinique	$C^4H^4O^2$	550,00	44,00
— butyrique	$C^8H^8O^2$	900,00	72,00
— valerique	$C^{10}H^{10}O^2$	1075,00	86,00
— œnanthylique	$C^{14}H^{14}O^2$	1425,00	114,00
— rutique	$C^{20}H^{20}O^2$	1950,00	156,00
— allylique (acroléine)	$C^6H^4O^2$	700,00	56,00
— benzoique	$C^{14}H^6O^2$	1325,00	106,00
— cumilique (essence de cumin)	$C^{20}H^{12}O^2$	1850,00	148,00
— anisique	$C^{16}H^8O^4$	1700,00	136,00
— salicylique	$C^{14}H^6O^4$	1525,00	122,00
Furfurol	$C^{10}H^4O^4$	1200,00	96,00
Acides volatils dérivés des alcools par oxydation.			
Acide formique	C^2HO^3, HO	575,00	46,00
— acétique	$C^4H^4O^4$	750,00	60,00
Acétone	$C^6H^6O^2$	725,00	58,00
Acétate de soude	$NaO, C^4H^3O^3 + 6HO$	1700,00	136,00
— d'ammoniaque	$AzH^3, HO, C^4H^3O^3$	962,50	77,00
— — distillé rapidement (acétamide)	$C^4H^5AzO^2$	737,50	59,00
— d'alumine	$Al^2O^3, 3(C^4H^3O^3)$	2554,25	204,35
— de plomb cristallisé	$PbO, C^4H^3O^3 + 3HO$	2375,00	190,00
— de cuivre neutre (Verdet)	$CuO. C^4H^3O^3 + HO$	1246,87	99,75
— — basique	$2CuO, HO, C^4H^3O^3 + 5HO$	2306,25	184,50
— neutre de potasse	$KO, C^4H^3O^3$	1225,00	98,00
Biacétate de potasse	$KO, HO, 2(C^4H^3O^3)$	1975,00	158,00
Acétate de baryte	$BaO, C^4H^3O^3 + 3HO$	1931,25	154,50
— de chaux	$CaO, C^4H^3O^3 + 3HO$	1325,00	106,00
— d'argent	$AgO, C^4H^3O^3$	2087,50	167,00
— d'oxydule de mercure	$Hg^2O, C^4H^3O^3$	3237,50	259,00
— de protoxyde de mercure	$HgO, C^4H^3O^3$	1987,50	159,00
Acide propionique ou métacétique	$C^6H^6O^4$	925,00	74,00
— butyrique	$C^8H^8O^4$	1100,00	88.00
— valérique	$C^{10}H^{10}O^4$	1275,00	102,00
— caproique	$C^{12}H^{12}O^4$	1450,00	116,00
— œnanthylique	$C^{14}H^{14}O^4$	1625,00	130,00
— caprylique	$C^{16}H^{16}O^4$	1800,00	144,00
— pélargonique	$C^{18}H^{18}O^4$	1975,00	158,00
— rutique	$C^{20}H^{20}O^4$	2150,00	172,00
— éthalique ou palmitique	$C^{32}H^{32}O^4$	3200,00	256,00
— margarique	$C^{34}H^{34}O^4$	3375,00	270,00
— stéarique	$C^{36}H^{3}$[illegible]O^4	3550,00	284,00
— acrylique	$C^6H^4O^4$	900,00	72,00
— angélique	$C^{10}H^8O^4$	1250,00	100,00
— damalurique	$C^{14}H^{12}O^4$	1600,00	128,00
— campholique	$C^{18}H^{16}O^4$	1950,00	156,00

CORPS.	FORMULES CHIMIQUES.	ÉQUIVALENTS chimiques. Oxygène. 100.	Hydrog. 1.
Acide moringique	$C^{30}H^{28}O^{4}$	3000,00	240,00
— oléique et élaïdique	$C^{36}H^{34}O^{4}$	3525,00	282,00
— érucique	$C^{44}H^{42}O^{2}$	4025,00	322,00
— sorbique	$C^{12}H^{8}O^{4}$	1400,00	112,00
— benzoïque	$C^{14}H^{5}O^{3}$, HO	1525,00	122,00
— nitrobenzoïque	$C^{14}H^{5}AzO^{8}$	2087,50	167,00
— binitrobenzoïque	$C^{14}H^{4}Az^{2}O^{12}$	2650,00	212,00
— toluique	$C^{16}H^{8}O^{4}$	1700,00	136,00
— cuminique	$C^{20}H^{12}O^{4}$	2050,00	164,00
— cinnamique	$C^{18}H^{8}O^{4}$	1850,00	148,00
Alcools biatomiques ou glycols.			
Glycol vinique	$C^{4}H^{6}O^{4}$	775,00	62,00
— propylique	$C^{6}H^{8}O^{4}$	950,00	76,00
— butylique	$C^{8}H^{10}O^{4}$	1125,00	90,00
— amylique	$C^{10}H^{12}O^{4}$	1300,00	104,00
— benzoïque (benzoglycol)	$C^{14}H^{8}O^{4}$	1550,00	124,00
Oxyde d'éthylène	$C^{4}H^{4}O^{2}$	550,00	44,00
Acides se rattachant aux glycols.			
Acide lactique	$C^{6}H^{6}O^{6}$	1125,00	90,00
— glycollique	$C^{4}H^{4}O^{6}$	950,00	76,00
— butyl-lactique	$C^{8}H^{8}O^{6}$	1300,00	104,00
— salicylique	$C^{14}H^{6}O^{6}$	1725,00	138,00
— phlorétique	$C^{18}H^{10}O^{6}$	2075,00	166,00
— oxalique	$C^{4}H^{2}O^{8}$	1125,00	90,00
— succinique	$C^{8}H^{6}O^{8}$	1475,00	118,00
— adipique	$C^{12}H^{10}O^{8}$	1825,00	146,00
— pimélique	$C^{14}H^{12}O^{8}$	2000,00	160,00
— subérique	$C^{16}H^{14}O^{8}$	2175,00	174,00
— sébacique	$C^{20}H^{18}O^{8}$	2525,00	202,00
— phtalique	$C^{16}H^{6}O^{8}$	2075,00	166,00
Acides fixes se dédoublant en acides pyrogénés sous l'influence de la chaleur.			
Acide malique	$C^{8}H^{4}O^{8}$, 2HO	1675,00	134,00
— maléique	$C^{8}H^{2}O^{6}$, 2HO	1450,00	116,00
— paramaléique	$C^{8}H^{4}O^{8}$	1450,00	116,00
— tartrique	$C^{8}H^{4}O^{10}$, 2HO	1875,00	150,00
— — anhydre	$C^{8}H^{4}O^{10}$	1650,00	132,00
— pyrotartrique	$C^{10}H^{6}O^{6}$, 2HO	1650,00	132,00
— pyruvique	$C^{12}H^{6}O^{10}$, 2HO	2200,00	176,00
— paratartrique	$C^{8}H^{6}O^{12}$, 2HO	2100,00	168,00
— citrique anhydre	$C^{12}H^{5}O^{11}$	2062,50	165,00
— — desséché	$C^{12}H^{5}O^{11}$, 3HO	2400,00	192,00
— — cristallisé	$C^{12}H^{5}O^{11}$, 5HO	2625,00	210,00
— aconitique	$C^{12}H^{3}O^{9}$, 3HO	2175,00	174,00
Acides itaconique, citraconique et mésaconique	$C^{10}H^{4}O^{6}$, 2HO	1625,00	130,00
Acide mucique	$C^{12}H^{8}O^{14}$, 2HO	2625,00	210,00
— pyromucique	$C^{10}H^{4}O^{6}$	1400,00	112,00
— méconique	$C^{14}H^{4}O^{14}$	2500,00	200,00
— pyroméconique	$C^{10}H^{4}O^{6}$	1400,00	112,00
— coménique	$C^{12}H^{4}O^{10}$	1950,00	156,00
— quinique	$C^{28}H^{22}O^{22}$	4575,00	366,00
Quinone	$C^{12}H^{4}O^{4}$	1350,00	108,00
Acide tannique (*tannin*)	$C^{54}H^{22}O^{34}$	7725,00	618,00

CORPS.	FORMULES CHIMIQUES.	ÉQUIVALENTS chimiques. Oxygène 100.	Hydrog. 1.
Acide gallique	$C^{14}H^{6}O^{10}$	2125,00	170,00
— pyrogallique	$C^{12}H^{6}O^{6}$	1575,00	126,00
— acétique (page 570)	»	»	»
Corps gras neutres. Leurs dérivés.			
Glycérine	$C^{6}H^{8}O^{6}$	1150,00	92,00
Acide glycérique	$C^{6}H^{6}O^{8}$	1325,00	106,00
— sulfoglycérique	$C^{6}H^{8}O^{6}, S^{2}O^{6}$	2150,00	172,00
— phosphoglycérique	$C^{6}H^{8}O^{6}, PhO^{5}, HO$	2150,00	172,00
Monoacétine	$C^{10}H^{10}O^{8}$	1675,00	134,00
Diacétine	$C^{14}H^{12}O^{10}$	2200,00	176,00
Triacétine	$C^{18}H^{14}O^{12}$	2725,00	218,00
Stéarine naturelle (tristéarine)	$C^{114}H^{110}O^{12}$	11125,00	890,00
Distéarine	$C^{78}H^{78}O^{12}$	8025,00	642,00
Monostéarine	$C^{42}H^{42}O^{8}$	4475,00	358,00
Acide stéarique (page 570)	»	»	»
Margarine (trimargarine)	$C^{108}H^{104}O^{12}$	10600,00	848,00
Monomargarine	$C^{40}H^{40}O^{8}$	4300,00	344,00
Acide margarique (page 570)	»	»	»
Oléine (monoléine)	$C^{42}H^{40}O^{8}$	4450,00	356,00
Dioléine	$C^{78}H^{74}O^{12}$	7975,00	638,00
Acide oléique (page 571)	»	»	»
Cétine (*blanc de baleine*)	$C^{64}H^{64}O^{4}$	6000,00	480,00
Alcalis organiques.			
Morphine	$C^{34}H^{19}AzO^{6}$	3562,50	285,00
Codéine	$C^{36}H^{21}AzO^{6}$	3737,50	299,00
Thébaïne	$C^{38}H^{31}AzO^{6}$	4012,50	321,00
Papavérine	$C^{40}H^{21}AzO^{8}$	4237,50	339,00
Narcotine	$C^{46}H^{25}AzO^{14}$	5337,50	427,00
Narcéine	$C^{46}H^{29}AzO^{18}$	5787,50	463,00
Cinchonine	$C^{40}H^{24}Az^{2}O^{2}$	3850,00	308,00
Quinine	$C^{40}H^{24}Az^{2}O^{4}$	4050,00	324,00
Aricine	$C^{46}H^{26}Az^{2}O^{8}$	4925,00	394,00
Sulfate de quinine	$C^{40}H^{24}Az^{2}O^{4}, SO^{3}+7HO$	5337,50	427,00
Strychnine	$C^{42}H^{22}Az^{2}O^{4}$	4175,00	334,00
Brucine	$C^{46}H^{26}Az^{2}O^{8}$	4925,00	394,00
Nicotine	$C^{20}H^{14}Az^{2}$	2025,00	162,00
Conine	$C^{16}H^{15}Az$	1562,50	125,00
Phényle	$C^{12}H^{5}O, HO$	1175,00	94,00
Aniline	$C^{12}H^{5}, AzH^{2}$	1162,50	93,00
Nitrobenzine	$C^{12}H^{5}(AzO^{4})$	1537,50	123,00
Binitrobenzine	$C^{12}H^{4}(AzO^{4})^{2}$	2100,00	168,00
Ethylamine	$C^{4}H^{7}Az$	562,50	45,00
Diéthylamine	$C^{8}H^{11}Az$	912,50	73,00
Triéthylamine	$C^{12}H^{15}Az$	1262,50	101,00
Méthylamine	$C^{2}H^{5}Az$	387,50	31,00
Propylamine	$C^{6}H^{9}Az$	737,50	59,00
Butylamine	$C^{8}H^{11}Az$	912,50	73,00
Amylamine	$C^{10}H^{13}Az$	1087,50	87,00
Caprylamine	$C^{16}H^{19}Az$	1612,50	129,00
Toluidine	$C^{14}H^{9}Az$	1337,50	107,00
Xylidine	$C^{16}H^{11}Az$	1512,50	121,00
Nitroxylidine	$C^{16}H^{10}(AzO^{4})Az$	2075,00	166,00
Cumidine	$C^{18}H^{13}Az$	1687,50	135,00
Urées.			
Urée	$C^{2}H^{4}Az^{2}O^{2}$	750,00	60,00
Méthylurée	$C^{4}H^{6}Az^{2}O^{2}$	925,00	74,00
Ethylurée	$C^{6}H^{8}Az^{2}O^{2}$	1100,00	88,00

CORPS.	FORMULES CHIMIQUES.	ÉQUIVALENTS chimiques. Oxygène 100.	Hydrog. 1.
Amylurée	$C^{12}H^{14}Az^{2}O^{2}$	1625,00	130,00
Acide urique	$C^{10}H^{2}Az^{4}O^{4}$, 2HO	2100,00	168,00
Murexide	$C^{12}H^{6}Az^{5}O^{8}$	2650,00	212,00
Acide hippurique	$C^{18}H^{8}AzO^{5}$, HO	2237,50	179,00
Huiles essentielles.			
Essence de térébenthine	$C^{20}H^{16}$	1700,00	136,00
— de poivre	$C^{15}H^{12}$	1275,00	102,00
— de citron	$C^{10}H^{8}$	850,00	68,00
— d'orange	$C^{10}H^{8}$	850,00	68,00
Cymène	$C^{20}H^{14}$	1675,00	134,00
Huile de pomme de terre	$C^{10}H^{12}O^{2}$	1100,00	88,00
Essence de menthe	$C^{20}H^{20}O^{2}$	1950,00	156,00
— de cèdre	$C^{32}H^{26}O^{2}$	2925,00	234,00
— d'amandes amères	$C^{14}H^{6}O^{2}$	1325,00	106,00
— de cannelle	$C^{18}H^{8}O^{2}$	1650,00	132,00
— de cumin	$C^{20}H^{12}O^{2}$	1850,00	148,00
Huile volatile de piment	$C^{20}H^{12}O^{4}$	2050,00	164,00
— de girofle	$C^{20}H^{12}O^{4}$	2050,00	164,00
Camphre	$C^{20}H^{16}O^{2}$	1900,00	152,00
Camphre de térébenthine	$C^{20}H^{16}$, ClH	2156,25	172,50
— de cubèbe	$C^{15}H^{12}$, ClH	1731,25	138,50
— de citron	$C^{10}H^{8}$, ClH	1306,25	104,50
Acide campholique	$C^{20}H^{18}O^{4}$	2125,00	170,00
— camphovinique	$C^{20}H^{14}O^{6}$, $C^{4}H^{5}O$, HO	2850,00	228,00
Ether camphorique	$C^{20}H^{14}O^{6}$, $2C^{4}H^{5}O$	3200,00	256,00
Essence de camomille (aldéhyde angélique)	$C^{10}H^{8}O^{2}$	1050,00	84,00
Essence de thym	$C^{20}H^{14}O^{2}$	1875,00	150,00
Valérol	$C^{12}H^{10}O^{2}$	1225,00	98,00
Essence d'anis	$C^{20}H^{12}O^{2}$	1850,00	148,00
Acide anisique	$C^{16}H^{8}O^{6}$	1900,00	152,00
Essence de moutarde	$C^{8}H^{5}AzS^{2}$	1237,50	99,00
— d'ail	$C^{6}H^{5}S$	712,50	57,00
Carbures d'hydrogène.			
Acétène	$C^{4}H^{6}$	375,00	30,00
Hydrure de propyle	$C^{6}H^{8}$	550,00	44,00
— de butyle	$C^{8}H^{10}$	725,00	58,00
— d'amyle	$C^{10}H^{12}$	900,00	72,00
Méthylène (n'a pu encore être obtenu)	$C^{2}H^{2}$	175,00	14,00
Gaz oléfiant	$C^{4}H^{4}$	350,00	28,00
Propylène	$C^{6}H^{6}$	525,00	42,00
Butylène	$C^{8}H^{8}$	700,00	56,00
Amylène	$C^{10}H^{10}$	875,00	70,00
Oléène	$C^{12}H^{12}$	1050,00	84,00
Œnantylène	$C^{14}H^{14}$	1225,00	98,00
Caprylène	$C^{16}H^{16}$	1400,00	112,00
Elaène	$C^{18}H^{18}$	1575.00	126,00
Paramylène	$C^{20}H^{20}$	1750,00	140,00
Cétène	$C^{32}H^{32}$	2800,00	224,00
Cérotène	$C^{54}H^{54}$	4725,00	378,00
Mélissène	$C^{60}H^{60}$	5250,00	420,00
Benzine ou benzène	$C^{12}H^{6}$	975,00	78,00
Phénol	$C^{12}H^{6}O^{2}$	1175,00	94,00
Toluène	$C^{14}H^{8}$	1150,00	92,00
Xylène	$C^{16}H^{10}$	1325,00	106,00
Cumène	$C^{18}H^{12}$	1500,00	120,00
Mésitylène	$C^{18}H^{12}$	1500,00	120,00

CORPS.	FORMULES CHIMIQUES.	ÉQUIVALENTS chimiques. Oxygène 100.	Hydrog. 1.
Cymène	$C^{20}H^{14}$	1675,00	134,00
Cinnamène	$C^{16}H^{8}$	1300,00	104,00
Naphtalène	$C^{20}H^{8}$	1600,00	128,00
Stilbène	$C^{28}H^{12}$	2250,00	180,00
Allyle	$C^{12}H^{10}$	1025,00	82,00
Matières animales.			
Fibrine. Albumine. Caséine.	$C^{48}H^{36}Az^{6}O^{16}$	6700,00	536,00
Gélatine	$C^{12}H^{10}Az^{2}O^{4}$	1775,00	142,00
Glycocolle (sucre de gélatine)	$C^{4}H^{5}AzO^{4}$	937,50	75,00
Leucine	$C^{12}H^{13}AzO^{4}$	1637,50	131,00
Créatine	$C^{8}H^{9}Az^{3}O^{4}$	1637,50	131,00
Créatinine	$C^{8}H^{7}Az^{3}O^{2}$	1412,50	113,00

MATIÈRES MINÉRALES OU FOSSILES.

461. *Tableau des matières minérales ou fossiles d'une utilité spéciale.* Extrait de la légende technique générale de la carte géologique détaillée de la France. *(Annales des mines, t. IV,* 1873.*)*

§ 1er. — AGRICULTURE ET HYGIÈNE.

Sols végétaux.

Landes et friches.
Marécages.
Bois et forêts.
Prairies naturelles.
Terres arables.
Vignobles.

Matières d'amendement.

Matières alumineuses et alcalines :
- Argiles, vases.
- Sables feldspathiques.
- Lignites pyriteux (pour cendres).

Matières calcaires (carbonatées et sulfatées) :
- Marne.
- Calcaire (pierre à chaux).
- Gypse (pierre à plâtre).
- Sables calcaires, faluns, tangues.

Matières phosphorées, azotées :
- Phosphate de chaux.
- Guano.

Eaux douces.

Eaux stagnantes :
- Névés.
- Glaciers.
- Lacs, étangs, mares.
- Nappes d'eau souterraines.

Eaux courantes :
- Cours d'eau souterrains.
- Sources ordinaires. Sources intermittentes.
- Ruisseaux. Torrents.
- Rivières, fleuves.

Eaux et matières salées.

Eaux marines et matières salées superficielles :
- Lagunes, estuaires.
- Mer océanique et lacs salés.
- Terres salées.

Eaux et matières salées souterraines :
- Sources salées, nappes salées souterraines.
- Roches salées.
- Sel gemme.

Eaux minérales et dépôts accessoires.

Sources minérales déterminées : froides, chaudes.

Sources d'eaux carbonatées :
- Eaux acidules (acide carbonique seul).

Eaux ferrugineuses (bicarbonatées et crénatées).
Eaux calcaires (bicarbonatées).
Eaux alcalines (bicarbonatées).
Sources d'eaux sulfatées et sulfurées :
Eaux sulfatées ferreuses.
Eaux sulfatées magnésiennes.
Eaux sulfatées calcaires.
Eaux sulfatées sodiques.
Eaux sulfureuses (hydrogène sulfuré).
Sources d'eaux chlorurées :
Eaux chlorurées simples.
Eaux iodo-bromurées.
Sources d'eaux azotées et carburées :
Eaux à glairines.
Eaux boueuses avec pétrole.
Sources geysériennes :
Eaux siliceuses.
Eaux boraciques.
Dépôts accessoires :
Lacs de salures diverses.
Boues minérales, efflorescences.
Terres bolaires.

EXPLOITATION FORESTIÈRE ET AGRICOLE.

Ateliers de flottage.
Scieries.
Charbonnages fixes.
Tanneries.
Fermes-modèles.
Moulins à farine.
Huileries.
Féculeries.
Sucreries.
Distilleries.
Usines agricoles complexes.

EXPLOITATION DES AMENDEMENTS ET DU SEL.

Mines, carrières, marnières, fours à chaux. (Voir § 5.)
Ateliers de préparation des phosphates.
Salines.
Marais salants.

UTILISATION DES EAUX ET DU VENT.

Sources de drainages artificiels.
Puits.
Puits artésiens. Puits jaillissants.
Appareils élévatoires et châteaux d'eau.
Moulins à vent. Moulins à farine.
Roues hydrauliques. Moulins à farine.
Machines à vapeur. Moulins à farine.
Établissements hydrothérapiques.
Établissements thermaux.
Bains sulfureux.
Établissements de bains de mer.

§ 2. — CHAUFFAGE ET ÉCLAIRAGE.

Combustibles de chauffage.

Tourbes :
Tourbe herbacée ou fibreuse.
Tourbe ligneuse.
Lignites :
Lignite terreux, terre d'ombre.
Bois bitumineux.
Lignite gras, compact ou piciforme.
Houilles :
Houille sèche flambante ou ligniteuse.
Houille grasse à longue flamme.
Houille grasse maréchale.
Houille grasse à courte flamme ou à coke.
Houille maigre ou anthraciteuse.
Anthracites :
Anthracite schisteuse ou feuilletée.
Anthracite résinoïde.
Bitumes :
Asphalte et bitume visqueux. Bitume rétinoïde.
Bitume oléifère.

Combustibles d'éclairage.

Houilles :
Houille grasse à longue flamme.
Houille oléifère, canel-coal.
Pétroles et gaz combustibles :
Schiste oléifère.
Roche bitumineuse oléifère.
Pétrole et naphte.
Hydrogène carboné gazeux.

EXPLOITATION DES COMBUSTIBLES.

Tourbières.
Expl. de comb. fossile à ciel ouvert. Expl. abandonnées.
Galeries de mine de comb. et fendues. Galeries abandonnées.
Puits de mine de combustible. Puits abandonnés.
Puits de pétrole.
Sondages et travaux de recherche. Indices.

PRÉPARATION DES COMBUSTIBLES.

Ateliers de préparation de la tourbe.
Fours à coke.
Fours à coke avec laverie de houille.
Usines à gaz.

§ 3. — ARTS CÉRAMIQUES ET CHIMIQUES.

Matières premières des poteries.

Matières premières des poteries communes :
Argile siliceuse pour poteries grès.

Argile figuline, ferrugineuse (bariolée) ou calcarifère.
Matières prem. des faïences fines et des porcelaines tendres :
Argile blanche, terre de pipe.
Sépiolithe, hydrosilicate de magnésie.
Matières premières des porcelaines dures :
Kaolin et pegmatite altérée.
Feldspath.
Matières premières des poteries réfractaires :
Argile pure.
Graphite argileux.

Matières premières des verres.

Matières premières des verres communs :
Sable plus ou moins ferrugineux.
Domite et autres matières vitrifiables.
Matières premières des verres incolores et des cristaux :
Sable quartzeux pur.
Quartz.

Matières premières des produits et des réactifs chimiques.

Oxydes de manganèse (minerais d'oxygène) :
Pyrolusite.
Psilomélane et oxydes hydratés.
Minerais de soufre, de sélénium et de tellure :
Soufre natif des terrains sédimentaires.
Soufre des solfatares.
Pyrites.
Minéraux sélénifères.
Minéraux tellurifères.
Matières premières des produits phosphorés et arséniés :
Apatite et minéraux phosphorés.
Réalgar et orpiment.
Mispickel et minéraux arsénifères.
Matières premières des produits chlorés, bromés, iodés :
Matières diverses chlorées.
Matières diverses et eaux mères bromées.
Matières diverses et eaux mères iodées.
Matières premières des produits azotés :
Sel ammoniac et matières ammoniacales diverses.
Roches salpêtrées.
Nitratine (azotate de soude).
Matières premières des produits carbonés :
Bitumes.
Pétroles. Naphte.
Calcaires exploités pour leur acide carbonique.
Matières premières des alcalis minéraux. (Voir § 1) :
Natrons.
Matières diverses sodiques et cendres de varechs.
Matières diverses potassiques et cendres de bois.
Carnallite. Sylvine (chlorure de potassium).
Matières premières des sels alcalino-terreux :
Dolomie.
Célestine (strontiane sulfatée).
Barytine (baryte sulfatée).
Matières premières de la couperose et des aluns :
Lignites pyriteux.
Ampélite alumineux et pyriteux.
Alunite.
Fondants métallurgiques :
Acide borique.
Borax.
Fluorine (spath-fluor).

Minéraux métallifères.

Matières premières des produits colorants métalliques. (Voir § 4) :
Minéraux cadmifères.
Pechblende et minéraux uranifères.
Fer chromé et minéraux chromifères.
Minéraux manganésifères.
Minéraux vanadifères.
Matières premières des produits d'étude :
Minéraux contenant du molybdène.
Wolfram et minéraux contenant du tungstène.
Rutile et minéraux contenant du titane.
Tantalite et minéraux tantalifères.
Cérite et minéraux contenant du cérium.
Béryl et minéraux contenant du glucyum.
Zircons et minéraux contenant du zirconium.
Lépidolite et minéraux contenant du lithium.
Eaux et minéraux contenant des éléments nouveaux.

EXPLOITATION.

Carrières. (Voir § 5.)
Minières, mines et travaux de recherche. (Voir § 4.)
Puits absorbants.

FABRICATION DES POTERIES.

Fabriques de poteries communes sans couverte.
Fabriques de poteries-grès.
Fabriques de poteries communes émaillées.

Fabriques de faïence fine et de porcelaine tendre.
Fabriques de porcelaine dure.
Fabriques de poteries réfractaires.

FABRICATION DES VERRES.

Verreries à bouteilles.
Verreries de gobeletterie.
Cristalleries.
Fabriques de glaces.

FABRICATION DES PRODUITS CHIMIQUES.

Fabriques de produits communs.
Fabriques de produits spéciaux.

§ 4. — MÉTALLURGIE.

Minerais de métaux précieux.

Minerais d'or proprement dits :
- Or natif d'alluvion.
- Or natif de filon.
- Tellurure d'or.

Minerais d'or et d'argent mélangés :
- Pyrite auro-argentifère.
- Minerais auro-argentifères tellurés.
- Minerais auro-argentifères arsenicaux.
- Minerais auro-argentifères antimoniaux.

Minerais d'argent proprement dits :
- Argent natif.
- Argent amalgamé.
- Argent chloruré.
- Argent sulfuré.
- Argents rouges arsenicaux.
- Argents rouges antimoniaux.

Minerais d'argent et de plomb mélangés :
- Galène argentifère.
- Plomb phosphaté, carbonaté, etc., argentifère.

Minerais d'argent, de plomb, de zinc et de cuivre mélangés :
- Cuivres gris argentifères arsenicaux.
- Cuivres gris argentifères antimoniaux.
- Galène, blende et pyrite cuivreuse argentifères.

Minerais de métaux communs.

Minerais de cuivre :
- Cuivre natif.
- Cuivre oxydulé.
- Cuivre carbonaté.
- Cuivre silicaté.
- Cuivre oxychloruré.
- Cuivre sulfuré.
- Cuivre pyriteux.
- Minerais de cuivre arsenicaux.
- Minerais de cuivre antimoniaux.

Minerais d'étain :
- Étain oxydé de filon.
- Étain oxydé d'alluvion.

Minerais de plomb :
- Galène pauvre et alquifoux.
- Plomb carbonaté.
- Plomb phosphaté, vanadaté, etc.

Minerais de zinc :
- Blende.
- Calamine (carbonate et silicate).
- Franklinite et minerais divers.

Minerais de fer.

Minerais de fer supérieurs ou aciéreux :
- Fer oxydulé à grains d'acier.
- Fer carbonaté spathique.
- Hématite manganésée.

Minerais de fer de qualité ordinaire :
- Fer oxydulé, titané, etc.
- Fer oligiste de filon.
- Hématite rouge sédimentaire.
- Fer oligiste siliceux.
- Fer oligiste argileux sédimentaire.
- Hématite brune de filon.
- Hématite brune sédimentaire.
- Fer pisolithique.

Minerais de fer défectueux :
- Fer carbonaté des houillères.
- Mine bleue oolithique et chamoisite.
- Mine brune oolithique.
- Limonite sulfureuse.
- Limonite phosphoreuse.

Minerais de métaux rares ou de production restreinte.

Minerais du groupe du platine. Alluvions platinifères :
- Platine.
- Palladium.
- Rhodium.
- Osmiure d'iridium.

Minerais de mercure :
- Mercure natif.
- Cinabre.

Minerais d'antimoine :
- Antimoine oxydé.
- Antimoine sulfuré.

Minerais de bismuth :
- Bismuth natif.
- Minerais bismuthifères.

Minerais de nickel et de cobalt :
- Pyrite nickelifère et nickel arsenical.
- Cobalt gris, etc.

Minerais d'aluminium :
- Bauxite, hématites alumineuses.
- Cryolithe et autres matières alumineuses.

EXPLOITATION. MINES MÉTALLIQUES.

Exploitations à ciel ouvert.
Galeries de mines. Galeries de mines abandonnées.
Puits de mines. Puits de mines abandonnées.
Travaux de recherche. Indices.

EXPLOITATION. MINIÈRES DE FER.

Minières à ciel ouvert. Minières à ciel ouvert abandonnées.
Bouches de minières souterraines. Bouches de minières abandonnées.
Puits de minières. Puits de minières abandonnées.

TRAITEMENT DES MÉTAUX AUTRES QUE LE FER.

Ateliers de préparation mécanique.
Usines métallurgiques de voie sèche (p. ex.) *à cuivre.*
Tas d'anciennes scories.
Usines métallurgiques de voie humide (p. ex.) *à cuivre.*

TRAITEMENT DU FER.

Lavoirs de minerais de fer.
Hauts fourneaux au charbon de bois. Tas d'anciens laitiers.
Hauts fourneaux au coke.
Forges au charbon de bois (affinage).
Tas d'anciennes scories.
Forges à la houille (puddlage).
Aciéries.
Usines à fer complexes.
Fonderies ou usines de ferronnerie.

§ 5. — ARTS DE CONSTRUCTION.

Matériaux de construction proprement dits.

Pierres laviques ou granitiques :
- Moellons, pierres de taille.
- Lave et tuf volcanique.
- Trachyte et tuf trachytique.
- Basalte, trachydolérite et vake.
- Porphyre et argilophyre.
- Trapp, mélaphyre et brèche ophytique.
- Granite et syénite.
- Diorite, diabase et euphotide.
- Gneiss et schiste cristallin.

Pierres arénacées ou schisteuses :
- Moellons, pierres de taille.
- Grès à ciment siliceux.
- Quartzite.
- Grès à ciment argileux.
- Arkose.
- Grès à ciment calcaire.
- Mollasse.
- Poudingue.
- Grauwacke.
- Schiste.
- Phyllade, schiste satiné.

Pierres siliceuses : moellons, pierres de taille :
- Meulière.
- Silex.
- Chailles et gaize dure.
- Jaspe.
- Schiste siliceux.

Pierres calcaires ou dolomitiques :
- Moellons, pierres de taille.
- Tuf calcaire.
- Calcaire lacustre, travertin tendre.
- Calcaire siliceux, travertin dur.
- Calcaire grossier coquillier, grignard.
- Calcaire grossier miliaire, tendre, lambourde.
- Calcaire grossier et glauconieux, résistant, vergelé.
- Calcaire crayeux.
- Calcaire crayeux, sableux et micacé, tuffeau.
- Calcaire lithographique.
- Calcaire corallien ou à polypiers.
- Calcaire oolithique grossier.
- Calcaire oolithique fin.
- Calcaire spathisé à entroques.
- Calcaire compact.
- Calcaire compact à encrines et à polypiers.
- Calcaire compact coquillier, lumachelle.
- Calcaire esquilleux.
- Calcaire esquilleux fossilifère.
- Calcaire brèche.
- Calcaire saccharoïde.
- Calcaire schisteux.
- Dolomie compacte.
- Dolomie saccharoïde.
- Dolomie schisteuse.

Pierres réfractaires :
- Grès siliceux et poudingues.
- Roche serpentineuse.
- Calcaire employé pour hauts fourneaux.

Schistes et pierres tégulaires :
- Schiste.
- Ardoises.
- Lauzes oolithiques.
- Lauzes phonolithiques.

Matières premières des mortiers, des briques et des enduits.

Terre pour pisés.

Terre à briques, à carreaux, à tuiles :
- Limon. Limon sableux.

Marne argileuse.
Glaise. Argile sableuse.
Argile compacte ou schisteuse.
Pierres à chaux ordinaires :
Calcaire pur, pierre à chaux grasse.
Calcaire impur, pierre à chaux maigre.
Pierres à chaux hydraulique et à ciment :
Marne magnésienne, pierre à chaux hydraulique.
Calcaire marneux, pierre à chaux hydraulique.
Calcaire argileux, pierre à ciment.
Matières complémentaires des mortiers :
Sables.
Arènes.
Pouzzolanes.
Trass.
Groises.
Pierres à plâtre :
Gypse fibreux ou lamelleux pur.
Gypse saccharoïde calcarifère.
Minerais d'asphalte :
Grès et schiste bitumineux.
Calcaire bitumineux.

Matériaux des chaussées.

Matériaux défectueux ou complémentaires :
Sables.
Calcaire tendre.
Calcaire marneux.
Matériaux d'empierrement de qualité moyenne :
Meulière.
Chailles et cherts.
Silex et jaspes.
Calcaire dur.
Dolomie.
Cailloux et galets.
Matériaux d'empierrement de qualité supérieure :
Quartzite.
Porphyre.
Cornéenne.
Matériaux d'empierrement de luxe :
Graviers.
Graviers coquilliers.
Calcaire bitumineux.
Matériaux de ballast :
Matériaux sableux et graveleux.
Matériaux fragmentaires.
Matériaux de pavage et de dallage schisteux ou calcaires :
Schiste.
Calcaire compact coloré.
Liais.
Matériaux de pavage et de dallage arénacés :
Grès à ciment calcaire.
Mollasse.
Arkoses.
Grès à ciment argileux.
Grès à ciment siliceux.
Quartzite.
Grauwacke.
Gros galets pour pavage.
Matériaux de pavage et de dallage laviques ou granitiques :
Lave et tuf volcanique.
Basalte et trachydolérites.
Trachyte et phonolithe.
Trapp et mélaphyre.
Porphyre.
Diorite.
Granite.
Gneiss et schiste cristallin.

EXPLOITATION DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION.

Carrières à ciel ouvert (importantes). Carrières abandonnées.
Bouches de car. souter. Bouches de car. souter. abandonnées.
Puits de carrières. Puits de carrières abandonnées.

PRÉPARATION DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION.

Briqueteries.
Tuileries.
Fabriques de briques creuses, de tuyaux de drainage.
Fours à chaux ordinaire.
Fours à chaux avec carrière de matériaux.
Fours à chaux hydraul. (calc., arg. ou marne magnésienne).
Fabriques de ciment naturel.
Fabriques de chaux hydrauliques artificielles.
Fours à plâtre.

§ 6. — ARTS MÉCANIQUES ET DÉCORATIFS.

Matières employées en raison de leurs actions physiques.

Pierres molaires pour meules à moudre :
Pierre meulière.
Porphyre trachytique.
Granite.
Pierres à aiguiser :
Grès à meules.
Pierres à faux
Pierres d'affûtage.
Schistes novaculaires, pierres à rasoirs.
Matières dures employées pour roder et polir :

Pierres ponces.
Tripoli.
Émeri.
Diamants carboniques.

Pierres à imprimer et à dessiner :
Pierres lithographiques.
Ardoises.

Pierres à crayons et matières traçantes :
Graphite pur.
Graphite argileux.
Sanguine.
Craie.
Stéatite, craie des tailleurs.

Couleurs naturelles :
Ocres rouges.
Ocres jaunes.
Outremer, lapis.
Terre verte.
Blanc de craie.

Matières absorbantes :
Terre à foulon, argile smectique.
Pierre à détacher, stéatite.

Matières plastiques :
Sables de moulerie.
Terre glaise, argile plastique.
Gypse lamelleux pour moulages délicats.

Matières d'usages divers :
Amiante.
Talc.
Mica.
Minette (à bourrer les mines).
Pierre à fusil.
Pierre de touche.
Pierre d'aimant.

Pierres à sculpter et à façonner.

Pierres dures :
Granite et syénite.
Diorite et diabase.
Euphotide.
Porphyre rouge.
Porphyre vert.
Jade.
Obsidienne.
Jaspe, aventurine.
Agates.

Pierres tendres :
Kersanton.
Pierre ollaire.
Ardoises.
Serpentine.
Écume de mer.
Jaïet.

Marbres et albâtres :
Marbre statuaire.
Marbre cristallin coloré.
Cipolin.
Marbre nodulo-schisteux.
Griotte.
Marbre tacheté.
Lumachelle.
Brèche simple.
Brèche à éléments multiples.
Albâtre onyx.
Albâtre oriental.
Albâtre gypseux.

Minéraux d'étude et d'ornement.

Minéraux employés pour l'optique :
Quartz, cristal de roche.
Tourmalines.
Spath calcaire.

Minéraux et matières minéralisées de joaillerie :
Calcédoines, cornalines et onyx.
Lapis, pierre des amazones.
Marcassites.
Grenats.
Turquoises.
Ambres.
Coraux.
Perles.

Pierres fines, gemmes :
Opales de feu.
Améthystes et quartz colorés.
Saphirs et améthystes orientales. Dichroïtes.
Émeraudes et aigues-marines. Cymophanes.
Topazes. Tourmalines.
Hyacinthes (zircons).
Rubis. Spinelles.
Diamants.

EXPLOITATIONS

Carrières. (Voir § 5.)
Minières, mines et travaux de recherche. (Voir § 6.)

INDUSTRIES LOCALES.

Marbreries.
Tailleries de pierres dures.
Laveries de gemmes.

ALLIAGES

462. Alliages. Les métaux qui satisfont aux conditions spéciales exigées par les applications industrielles, sont très peu nombreux. Les seuls métaux qu'on utilise purs sont : le fer, le zinc, le cuivre, le plomb, le mercure, l'aluminium et le platine; les autres ne sont employés qu'alliés à d'autres métaux, et ceux qui précèdent forment aussi d'importants alliages. Certains métaux étant trop mous, s'useraient très vite; d'autres, trop cassants, se briseraient sous des pressions peu considérables. Tandis qu'en combinant convenablement ces métaux on obtient des alliages jouissant des propriétés qu'on recherche.

Les alliages sont bons conducteurs de la chaleur et de l'électricité.

Principaux alliages usuels. (Voir page 209.)

Monnaies d'or	Or	90
	Cuivre	10
Monnaies d'argent	Argent	90 et 83,5
	Cuivre	10 et 16,5
Bronze des monnaies et médailles	Cuivre	95
	Étain	4
	Zinc	1
Bronze d'aluminium (1)	Aluminium	10
	Cuivre	90
Ferro-Aluminium	Aluminium	11
	Fer	100
	Traces de silicium	
Laiton d'aluminium	C'est un laiton dans lequel 3 p. 100 du zinc sont remplacés par 3 p. 100 d'aluminium.	
Bronze rouge, pour coussinets et organes de machines	Cuivre	87
	Étain	13
Laiton laminé français	Cuivre	64,6
	Zinc	33,7
	Plomb	1,4
	Étain	0,2
Laiton fondu français, pour fonte délicate	Cuivre	63,7
	Zinc	33,55
	Plomb	2,5
	Étain	0,25
Laiton fondu français	Cuivre	72,43
	Zinc	22,75
	Plomb	1,87
	Étain	2,95
Laiton de Bristol	Cuivre	75,7
	Zinc	24,3
Laiton d'Oker	Cuivre	77,88
	Zinc	24,42
	Fer	2,32
	Plomb	1,09

(1) Le bronze d'aluminium est aussi résistant à la compression que les meilleurs aciers; il peut remplacer avantageusement le cuivre rouge pour la fabrication de divers organes mécaniques : tuyaux de vapeur, etc.

Laiton fondu d'Iserlohn	Cuivre	63,7
	Zinc	33,5
	Étain	2,5
	Plomb	0,3
Laiton allié au fer	Cuivre	60
	Zinc	38,2
	Fer	1,8
Bronze phosphoreux (1), pour têtes de bielles, pignons de laminoirs, etc.	Cuivre	90,34 et 90,86
	Étain	8,90 et 8,56
	Phosphore	0,76 et 0,196
Maillechort	Cuivre	50
	Zinc	25
	Nickel	25
Alliage de Darcet	Bismuth	8
	Plomb	5
	Étain	3

Divers alliages de métal blanc pour coussinets.

	ÉTAIN.	ANTIMOINE.	ZINC.	FER.	PLOMB.	CUIVRE.
Pour faibles charges	80 et 85	10 et 12	»	»	»	5 et 8
— grandes charges	90	8	»	»	»	2
— moulins	15	»	40	»	42	3
— axes lourds	72,7	18,2	»	»	»	9,1
— grande vitesse de rotation	17 et 36,4	77 et 9	54,5	»	»	6
— paliers de butée	36	»	55	»	»	»
Alliage présentant le maximum de dureté	5	»	»	70	»	2,5
Alliage moins dur	12	82	2	»	»	4
Alliage à bon marché	2	8	88	»	»	8

(Pour les aciers et les fontes, voir nos 552 et suivants.)

PESANTEURS SPÉCIFIQUES

463. La densité, pesanteur spécifique, ou poids spécifique d'un corps est le rapport du poids de l'unité de volume de ce corps au poids de l'unité de volume d'un autre corps pris pour terme de comparaison. L'eau distillée à son maximum de densité, c'est-à-dire à la température de 4° environ, étant prise pour terme de comparaison, ce qu'on fait le plus habituellement dans la pratique, adoptant le décimètre cube pour unité de volume, comme un décimètre cube de cette eau pèse 1 kilog., il en résulte que *la densité d'un corps est exprimée par le nombre de kilogrammes que pèse le décimètre cube de ce corps.*

De cette convention, il résulte qu'en général on a :

$$d = \frac{P}{V}, \quad \text{d'où} \quad P = dV, \quad \text{et} \quad V = \frac{P}{d}.$$

(1) Cet alliage est très résistant.

d densité;
P poids du corps en kilogrammes;
V volume du corps en décimètres cubes.

Applications : 1re. Le poids d'un morceau de fer est $35^k,046$ et son volume $4^{dc},5$; quelle est sa densité?

La première des formules précédentes donne :

$$d = \frac{35,046}{4,5} = 7,788.$$

2e. Quel est le poids d'un morceau de fer dont le volume est de $4^{dc},5$?

La densité du fer étant 7,788, la deuxième des formules précédentes donne :

$$P = 7,788 \times 4,5 = 35^k,046.$$

3e. Pour $P = 35^k,046$ et $d = 7,788$, la troisième des formules précédentes donne :

$$V = \frac{35,046}{7,788} = 5^{dc},5.$$

464. *Remarques :* 1re. Dans la pratique, on peut, sans inconvénient, admettre que la densité de l'eau ordinaire est égale à l'unité, au lieu de 0,9987 qu'elle est moyennement dans nos climats, et, de plus, aux températures ordinaires de l'atmosphère, on peut, sans erreur sensible, négliger l'influence de la dilatation sur la densité des corps.

2e. Pour les gaz et les vapeurs, on prend pour unité de densité la densité de l'air à la température de 0° et sous la pression atmosphérique de $0^m,76$ de mercure. Il en résulte que P étant le poids d'un volume V de gaz ou de vapeur dont la densité est d par rapport à l'air, on a, $0^k,001\,293$ étant le poids d'un décimètre cube d'air :

$$P = Vd \times 0,001\,293.$$

Par rapport à l'eau, la densité de l'air à 0° et sous la pression $0^m,76$ est, d'après Biot et Arago, $\frac{1}{770} = 0,001\,299$, et plus rigoureusement 0,001 299 541; par rapport au mercure, elle est $\frac{1}{10366} = 0,000\,096$. D'après les recherches les plus récentes, le poids de l'air atmosphérique sec à Paris, à la température de la glace fondante et sous la pression de $0^m,76$, est, à volume égal, $\frac{1}{773,28}$ de celui de l'eau distillée.

A Paris, à 60 mètres au-dessus du niveau de la mer, à la température 0° et sous la pression $0^m,76$, Regnault ayant trouvé, dans ses dernières expériences, que 1 litre d'air atmosphérique pèse $1^g,293\,187$, comme 1 litre d'eau au maximum de densité pèse $1000^g,00$, et que le poids de 1 litre de mercure à 0° est $13\,595^g,93$, par rapport à l'eau, la densité de l'air à 0° et sous la pression $0^m,76$ est 0,001 293 187, et par rapport au mercure elle est 0,000 0951 (consulter le tableau suivant).

465. ***Tableau des densités de quelques corps, celle de l'eau à 4° étant prise pour unité.***

SOLIDES.			
CORPS SIMPLES.	Densités.	COMPOSÉS BINAIRES.	Densités.
Aluminium fondu.	2,56	Alumine (émeril).	3,90
— laminé.	2,67	Sel ammoniac.	1,528
Antimoine.	6,72	Protoxyde d'antimoine.	5,778
Argent fondu.	10,47	Sulfure —	4,334
— monnaie de Fr. à 9/10 de fin.	10,121	Oxyde d'argent.	7,250
Arsenic.	5,67	Sulfure —	7,20
Bismuth.	9,822	Bromure —	5,128
Bore adamantin.	2,69	Chlorure — fondu.	5,548
Cadmium.	8,69	Iodure — —	5,614
Calcium.	1,584	Acide arsénieux vitreux.	3,738
Carbone. { Anthracite.	1,34 à 1,46	— — opaque.	3,699
Carbone. { Graphite.	2,09 à 2,24	— arsénique.	3,734
Carbone. { Diamant.	3,50 à 3,53	Chlorure de baryum.	3,90
Cérium.	5,50	Oxyde de bismuth.	8,174
Chrome.	5,90	Sulfure —	6,54
Cobalt fondu.	7,812	Acide borique hydraté.	1,480
Cuivre fondu.	8,85	Oxyde de cadmium.	6,95
— laminé ou forgé.	8,95	Fluorure de calcium (spath-	
Étain.	7,291	fluor).	3,20
Fer.	7,788	Chlorure de calcium.	2,23
Glucinium.	2,10	Chaux.	2,3
Indium.	7,40	Protoxyde de cuivre.	5,30
Iode.	4,948	Deutoxyde —	6,13
Iridium.	22,41	Protosulfure —	5,69
Lithium.	0,594	Deutoxyde d'étain.	6,70
Magnésium.	1,743	Protosulfure —	5,267
Manganèse.	8,01	Bisulfure —	4,415
Mercure solide à —40°.	14,39	Oxyde de fer manétique.	5,40
Molybdène.	8,60	Peroxyde de fer.	5,225
Nickel fondu.	8,279	Sulfure de fer. { Bisulfure (pyrite).	5,00
— forgé.	8,666	Sulfure de fer. { — (pyr. blanche).	4,84
Or fondu.	19,26	Sulfure de fer. { Pyrite magnétique.	4,62
— forgé.	19,36	Glace à 0°.	0,918
— monnaie de Fr. à 9/10 de fin.	17,65	Magnésie (écume de mer).	0,988 à 1,279
Osmium.	23,00	Oxyde rouge de manganèse.	4,722
Palladium.	11,30	Peroxyde de manganèse.	4,48
— laminé.	11,80	Sesquioxyde —	4,81
Phosphore.	1,77	Protosulfure —	3,95
Platine fondu.	21,15	Protoxyde de mercure (oxyde	
— laminé.	23,00	rouge de mercure).	11,00
Plomb.	11,35	Protosulfure de mercure (cina-	
Potassium.	0,865	bre, vermillon).	8,124
Rhodium.	11,00	Protoïodure de mercure.	7,75
Rubidium.	1,52	Biiodure —	6,32
Ruthénium.	11,30	Protochlorure — (sublimé	
Sélénium.	4,30	corrosif).	5,42
Silicium graphitoïde.	2,49	Sous-chlorure de mercure (ca-	
— cristallisé.	2,65	lomel).	7,14
Sodium.	0,972	Sulfure de molybdène.	4,60
Soufre octaédrique.	2,07	Protoxyde de plomb (litharge).	7,90
— prismatique.	1,96 à 1,99	Oxyde salin (minium).	8,94
Strontium.	2,542	Séléniure de plomb.	7,69
Tellure.	6,24	Sulfure — (galène).	7,58
Thallium.	11,86	Iodure —	6,10
Titane.	5,30	Bromure —	5,194
Tungstène.	17,60	Chlorure —	3,90
Uranium.	18,33 à 18,40	Bromure de potassium.	1,62
Zinc.	7,19	Chlorure —	1,836
Zirconium.	4,14	Iodure de potassium.	3,00

SOLIDES (suite).

	Densités.
Acide silicique. { Quartz hyalin	2,653
Acide silicique. { Agate	2,615
Chlorure de sodium. { Sel gemme	2,257
Chlorure de sodium. { Sel marin	2,207
Acide sulfurique anhydre	1,97
Peroxyde de titane (rutile)	4,25
Acide tungstique	6,00
Oxyde de zinc	5,60
Sulfure de zinc (blende)	4,16
SELS SIMPLES.	
Sulfate d'argent	5,34
Azotate de baryte	3,185
Carbonate —	4,30
Sulfate — (spath pesant)	4,70
Tungstate de chaux	6,00
Carbonate de chaux. { Aragonite	2,946
Carbonate de chaux. { Spath d'Islande	2,723
Sulfate de chaux. { Anhydrite	2,90
Sulfate de chaux. { Gypse	2,33
Carbonate de fer (fer spathique)	3,85
Titanate de fer (chrictonite)	4,727
Silicate de glucine (phénakite)	2,969

	Densités.
Borate de magnésie (boracite)	2,50
Carbonate de magnésie (giobertite)	2,88
Carbonate de manganèse	3,55
Azotate de plomb	4,40
Carbonate de plomb (céruse)	6,57
Chromate de plomb naturel	6,60
Molybdate de plomb	6,70
Sulfate —	6,30
Tungstate —	8,00
Azotate de potasse	1,937
Chromate —	2,70
Sulfate —	2,40
Alun potassique	1,90
Azotate de soude	2,29
Borate —	1,716
Sulfate — anhydre	2,63
Azotate de strontiane	2,89
Carbonate —	3,65
Sulfate — (célestine)	3,95
Aluminate de zinc (spinelle zincif)	4,70
Carbonate de zinc	4,50

MINÉRAUX DIVERS.	Densités.
Quartz. SiO^3	2,655
Agate. SiO^3	2,58 à 2,62
Opale. SiO^3, HO	2,03 à 2,10
Zircon. ZrO^3, SiO^3	4,04 à 4,67
Amphibole { trémolite. $4(MgO, CaO), 3SiO^3$	2,93 à 3,08
Amphibole { actinote $4(MgO, CaO, FeO), 3SiO^3$	3,04 à 3,09
Amphibole { hornblende. $4(MgO, CaO, FeO), 3SiO^3, Al^2O^3$	3,128
Jade néphrite. $4(MgO, CaO), 3SiO^3$	2,96 à 3,06
Pyroxène { diopside. $3(CaO, MgO), 2SiO^3$	3,300
Pyroxène { augite. $3(FeO, CaO), 2SiO^3$	3,324
Péridot. $3(MgO, FeO), SiO^3$	3,33 à 3,35
Talc. $4MgO, 3SiO^3 + HO$	2,713
Serpentine. $9MgO, 4SiO^3 + 6HO$	2,50 à 2,66
Calamine. $2(3ZnO, SiO^3) + 3HO$	3,35 à 3,50
Feldspath { orthose. $Al^2O^3, 3SiO^3 + KO, SiO^3$	2,50 à 2,59
Feldspath { albite. $Al^2O^3, 3SiO^3 + NaO, SiO^3$	2,630
Feldspath { oligoclase. $Al^2O^3, 2SiO^3 + (NaO, CaO), SiO^3$	2,63 à 2,67
Feldspath { labradorite. $Al^2O^3, SiO^3 + (CaO, NaO), SiO^3$	2,70 à 2,72
Feldspath { anorthite. $3(Al^2O^3, SiO^3) + 3CaO, SiO^3$	2,750
Obsidienne. $Al^2O^3, 3SiO^3 + KO, SiO^3$	2,30 à 2,54
Amphigène. $3(Al^2O^3, 2SiO^3) + 3KO, 2SiO^3$	2,481
Épidote. $2[(Al^2O^3, Fe^2O^3), SiO^3] + 3CaO, SiO^3$	3,460
Émeraude. $Al^2O^3, 2SiO^3 + 3GlO, 2SiO^3$	2,67 à 2,75
Grenat { almandin. $Al^2O^3, SiO^3 + 3FeO, SiO^3$	3,92 à 4,20
Grenat { pyrope. $Al^2O^3, SiO^3 + 3FeO, SiO^3$	3,66 à 3,72
Mica. $Al^2O^3, Fe^2O^3 - MgO, KO, NaO - SiO^3$	2,71 à 3,13
Tourmaline. $Al^2O^3, Fe^2O^3 - NaO, MgO, FeO - SiO^3, BO^3, Fl$	3,04 à 3,12
Topaze. $4(2Al^2O^3, SiO^3) + 3SiFl^2$	3,51 à 3,58
Withérite. BaO, CO^2	4,277
Calcaire. CaO, CO^2	2,70 à 2,73
Aragonite. CaO, CO^2	2,935
Dolomie. $CaO, CO^2 + MgO, CO^2$	2,83 à 2,94
Giobertite. MgO, CO^2	2,99 à 3,15

SOLIDES (*Suite*).

	Densités.
Sidérose. FeO, CO^2	3,83 à 3,88
Smithsonite. ZnO, CO^2	4,30 à 4,45
Malachite. $2CuO, CO^2+HO$	3,928
Azurite. $3CuO, 2CO^2+HO$	3,50 à 3,83
Rutile. TiO^2	4,277
Anatase. TiO^2	3,880
Brookite. TiO^2	4,137
Ilménite. $6(FeO, TiO^2)+Fe^2O^3$	4,895
Wolfram. $5(FeO, WO^3)+MnO, WO^3$	7,360
Fer chromé. $(FeO, MgO), (Cr^2O^3, Al^2O^3)$	4,32
Mispickel. $FeAs+FeS^2$	5,22 à 6,07
Kupfernickel. Ni^2As	7,723
Smaltine. Co^3As^4	6,410
Cobaltine. $CoAs+CoS^2$	6,26 à 6,37
Apatite. $3(3CaO, PO^5)+\left\{\begin{matrix}CaCl\\CaFl\end{matrix}\right\}$	3,235
Turquoise. $2Al^2O^3, PO^5+5HO$	2,52 à 2,80
Pyromorphite. $3(3PbO, PO^5)+PbCl$	6,59 à 7,05
Molybdénite. MoS^2	4,941
Stibine. SbS^3	4,620
Pyrite (fer sulfuré jaune). FeS^2	5,022
Sperkise (fer sulfuré blanc). FeS^2	4,91 à 4,99
Pyrrhotine (fer sulfuré magnétique). $6FeS+FeS^2$	4,619
Blende. ZnS	4,095
Galène. PbS	7,26 à 7,60
Chalkosine. Cu^2S	5,784
Chalkopyrite. $CuS+FeS$	4,167
Phillipsite. $3Cu^2S+Fe^2S^3$	5,054
Panabase. $4(Cu^2, Fe, Ag, Zn)S+(Sb, As)S^3$	4,62 à 4,93
Argyrose. AgS	7,241
Psaturose. $6AgS+SbS^3$	6,272
Proustite. $3AgS+AsS^3$	5,500
Barytine. BaO, SO^3	4,48 à 4,72
Célestine. SrO, SO^3	3,92 à 3,96
Anhydrite. CaO, SO^3	2,90 à 2,96
Gypse. CaO, SO^3+2HO	2,330
Cryolithe. $3NaFl+Al^2Fl^3$	2,963
Fluorine. $CaFl$	3,14 à 3,19
Corindon. Al^2O^3	3,99 à 4,02
Diaspore. Al^2O^3, HO	3,368
Spinelle. MgO, Al^2O^3	3,55 à 3,61
Cymophane. GlO, Al^2O^3	3,72 à 3,74
Pechblende. UO, U^2O^3	6,01 à 8,07
Pyrolusite. MnO^2	4,82 à 4,97
Fer oligiste. Fe^2O^3	5,24 à 5,28
Gœthite. Fe^2O^3, HO	4,04 à 4,40
Limonite. $2Fe^2O^3+3HO$	3,60 à 4,00
Fer oxydulé (aimant). FeO, Fe^2O^3	4,94 à 5,18
Cassitérite. SnO^2	6,30 à 7,10

MINÉRAUX EN POUDRE, d'après Beudant.	Densités.	ROCHES DIVERSES.	Densités.
Aragonite	2,947	Diorite	2,92 à 3,10
Carbonate de chaux	2,723	Dolérite	2,8 à 2,9
Gypse	2,332	Granite	2,63 à 2,75
Carbonate de plomb	6,729	Grès	2,55 à 2,65
Sulfure de plomb	7,759	Phyllade (schiste)	2,65 à 2,75
Malachite	3,590	Pierre ollaire	2,55
Quartz	2,654	Porphyre	2,61 à 2,86
Sulfate de strontiane	2,959	Quartzite	2,8

SOLIDES (*Suite*).

	Densités.
Rosalte	2,78 à 3,09
Serpentine	2,49 à 2,66
Syénite	2,63 à 2,70
Trachyte	2,7 à 2,8
COMBUSTIBLES MINÉRAUX.	
Anthracite	1,343 à 1,462
Asphalte	1,063
Bitume brun	0,828
— noir	1,073
— rouge	1,160
Graphite	2,09 à 2,24
Houille grasse dure	1,315 à 1,322
— grasse maréchale	1,280 à 1,302
— grasse à longue flamme	1,276 à 1,363
— sèche à longue flamme	1,362
Jayet	1,305 à 1,316
Lignite imparfait	1,100 à 1,185
— parfait	1,254 à 1,351
— passant au bitume	1,157 à 1,197
Naphte (liquide)	0,70 à 0,84
MÉTÉORITES.	
Holosidères (fer sans matières pierreuses)	7,0 à 8,0
Syssidères (fer avec grains pierreux)	7,1 à 7,8
Sporadosidères (pierre avec grains de fer) — polysidères (fer abondant)	6,5 à 7,0
Sporadosidères — oligosidères (fer peu abondant)	3,1 à 3,8
Sporadosidères — cryptosidères (fer en grains microscop.)	3,0 à 3,8
Asidères (pas de fer)	1,9 à 3,6
FER MÉTÉORIQUE.	
D'Alabama	7,265
De Black-Mountain	7,261
De Caille (Var)	7,64
Du Cap	7,544
De Lenarto	7,70
Du Pérou	7,355
AÉROLITHES tombés à :	
Alais (1806)	1,70
Chantonnay (1812)	3,67
Juvenas (1821)	3,11
Château-Renard (1841)	3,54
Utrecht (1843)	3,61
Klein-Wenden (1843)	3,701
PIERRES PRÉCIEUSES.	
1° Pierres transparentes.	
Andalousite	3,16
Cordiérite (saphir d'eau)	2,58

	Densités.
Corindon (saphir oriental, rubis oriental, etc.)	3,99 à 4,02
Cymophane	3,74
Diamant	3,50 à 3,53
Disthène bleu	3,67
Émeraude (ém. verte, aigue marine, béryl)	2,68 à 2,75
Euclase vert d'eau	3,08
Grenat	3,63 à 4,20
Idocrase verte	3,39
Péridot (olivine)	3,33 à 3,35
Quartz (cristal de roche, topaze d'Espagne, améthyste, etc.)	2,65
Spinelle	3,56 à 3,61
Topaze	3,51 à 3,58
Tourmaline	3,04 à 3,12
Zircon	4,04 à 4,67
2° Pierres translucides ou opaques.	
Agate (calcédoine, cornaline, etc.)	2,55 à 2,62
Hyperstène	3,42
Jade	2,97 à 3,02
Jadéite	3,34
Jaspe	2,52 à 2,76
Labradorite	2,72
Lazulite en cristaux	2,51
Lazulite en roche (lapis lazuli)	2,81 à 3,04
Malachite	3,92 à 4,00
Marcasite (pyrite jaune)	5,00 à 5,02
Obsidienne aventurinée	2,36
Oligoclase (pierre du soleil)	2,67
Opale	2,03 à 2,10
Orthose (pierre du soleil, pierre de lune, etc.)	2,56 à 2,59
Prehnite	2,63 à 2,65
Quartz (aventuriné, œil de chat, etc.)	2,65 à 2,68
Rhodonite (mang. silicaté, rose)	3,64
Silex résinite	2,04 à 2,23
Spath satiné (calcaire fibreux)	2,73
Succin (ambre)	1,06 à 1,11
Turquoise orientale (de vieille roche)	2,52 à 2,82
Turquoise osseuse (de nouvelle roche)	3,06 à 3,11
MATÉRIAUX DIVERS *pour les constructions, l'ornement et la statuaire.*	
Albâtre calcaire	2,69 à 2,78
— gypseux	2,30 à 2,32
Anhydrite	2,94 à 2,96
Ardoise	2,87 à 2,90
Asphalte	1,06
Basalte	2,45 à 2,85
Brique rouge	2,17
— dure, très cuite	1,56
Calcaire coquillier, en poudre	2,60 à 2,68

SOLIDES (*Suite*).

	Densités.		Densités.
Calcaire coq., en morceaux secs.	1,94 à 2,41	Acier fondu recuit.	7,719
— compact	2,68 à 2,70	Fonte grise.	6,79 à 7,05
— lithographique.	2,65 à 2,67	— blanche.	7,44 à 7,84
— liais.	2,25 à 2,45	Argent 90, cuivre 10.	10,121
— à bâtir grossier.	1,70 à 1,90	— 62, — 38.	9,603
Granit.	2,64 à 2,76	Cuivre 90, aluminium 10. . . .	7,7
Grès, en moyenne.	2,5	Étain 60, antimoine 40.	7,051
Gypse (pierre à plâtre) en poudre.	2,26 à 2,28	— 21, — 79.	7,215
— — en morceaux.	2,17 à 2,20	— 94, argent 6.	7,494
Marbre statuaire.	2,70 à 2,72	— 33, bismuth 67.	8,683
Marbres divers.	2,65 à 2,74	— 61, cuivre 39.	8,332
Marbre magnésien (dolomie). . .	2,83 à 2,84	— 48, — 52.	8,531
— d'Afrique.	2,798	— 77, zinc 23.	7,362
— de Carrare.	2,717	— 63, — 37.	7,146
— d'Égypte, vert.	2,668	Plomb 75, antimoine 25.	10,101
— florentin, jaune.	2,516	— 74, argent 26.	10,743
— français.	2,649	— 62, bismuth 38.	11,037
— de Paros.	2,838	— 69, étain 31.	10,073
— des Pyrénées.	2,726	— 96, or 4.	11,301
— de Sibérie.	2,728	— 87, platine 13.	12,207
Porphyre.	2,67 à 2,75	— 75, zinc 25.	9,430
		Zinc 77, cuivre 23.	7,301
VERRES.		— 50, — 50.	8,265
		Bronze antique.	9,200
Cristal.	3,330	— des canons.	8,441 à 9,235
Borate de plomb.	5,709	— de tamtam.	8,813
Crown de Clichy.	2,657	— trempé.	8,686
— de M. Feil.	2,629	Cuivre jaune.	8,427
— ordinaire.	2,447	Maillechort.	8,615
Flint de Guinand.	3,589	Métal de Darcet.	9,795
— Faraday.	4,358	Tombac.	8,655
— lourd.	4,056		
Silicate plombique.	5,331	BOIS.	
— sesquiplombique.	5,895		
— biplombique.	6,620	Acajou de Cuba.	0,563
— triplombique.	6,720	— d'Espagne.	0,852
Verre à vitres.	2,527	— de Honduras.	0,560
— à glaces.	2,463	— de Saint-Domingue. . . .	0,755
— commun, à base de soude.	2,451	Acacia vert.	0,820
— fin, —	2,436	— à 20 p. 100 d'humidité. .	0,717
— commun, à base de potasse	2,460	Aune.	0,555
— fin, —	2,454	— à 20 p. 100 d'humidité. . .	0,601
— opalin.	2,525	Arbousier.	1,035
— soluble.	1,250	Bouleau.	0,720 à 0,738
		— à 20 p. 100 d'humidité.	0,812
PORCELAINES.		Buis de France.	0,91
		— de Hollande.	1,32
Kaolin.	2,21 à 2,26	Cèdre du Liban, sec.	0,486 à 0,575
Porcelaine de Sèvres dégourdie.	2,619	Charme, 20 p. 100 d'humidité. .	0,756
— — cuite. . . .	2,242	Chêne (d'après Karmarsch). . .	0,610
— de Berlin dégourdie.	2,613	— de démolition.	0,732
— — cuite. . . .	2,452	— anglais.	0,934
— de Chine.	2,384	— du Canada.	0,872
— de Saxe.	2,493	— de 60 ans (le cœur). . . .	1,17
		Chêne à glands pédonculés, 20 p. 100 d'humidité.	0,808
COMPOSÉS MÉTALLIQUES DIVERS.		Chêne à glands sessiles, 20 p. 100 d'humidité.	0,872
Acier doux.	7,833	Cyprès, un an de coupe.	0,664
— forgé.	7,840	Ébène.	1,125
— trempé.	7,816	— noir.	1,187
— Wootz.	7,665	— vert.	1,210
— fondu étiré.	7,717		

SOLIDES (*Suite*).

	Densités.	2° *En morceaux.*	Densités.
Érable	0,645		
— 20 p. 100 d'humidité	0,674		
Frêne	0,845	Bouleau	0,364
— 20 p. 100 d'humidité	0,697	Cèdre	0,238
Grenadier	1,35	Cerisier	0,411
Hêtre	0,750 à 0,852	Charme	0,455
— un an de coupe	0,659	Châtaignier	0,279
— 20 p. 100 d'humité	0,823	Chêne blanc	0,421
If	0,744 à 0,807	Frêne	0,547
Liège	0,240	Hêtre	0,518
Mélèze	0,543	Noyer	0,625
Mûrier d'Espagne	0,89	Orme	0,357
Noyer brun	0,685	Peuplier	0,245
— vert	0,920	Pin jaune	0,333
Olivier	0,676	Pommier	0,455
Oranger	0,705	Poudre à canon	2,085
Orme	0,553	— à fusil	2,189
— vert	0,763	SUBSTANCES DIVERSES DU RÈGNE VÉGÉTAL.	
— 20 p. 100 d'humidité	0,723		
Peuplier	0,387		
— blanc	0,511	Caoutchouc	0,989
— 20 p. 100 d'humidité	0,477	Gutta-percha	0,966
Pin blanc	0,553	Gomme adragante	1,316
— rouge	0,657	— myrrhe	1,360
— du Nord	0,738	— sang-dragon	1,204
— laryx de choix	0,640	— sandarac	1,092
— sylvestre, 20 p. 100 d'humid.	0,559	— mastic	1,074
Platane	0,648	Résines : Benjoin	1,092
Poirier	0,732	Gaïac	1,205
Pommier	0,734	Jalap	1,218
Prunier	0,872	Colophane	1,07
Bois de rose	1,031	Succin transparent	1,078
Sapin blanc d'Angleterre	0,555	— opaque	1,086
— — d'Écosse	0,529	Amidon	1,529
— jaune	0,657	Fécule	1,502
— 20 p. 100 d'humidité	0,493	Coton	1,949
Satin	0,964	Lin	1,792
Saule	0,487	SUBSTANCES DIVERSES DU RÈGNE ANIMAL.	
Sorbier	0,673		
Sycomore	0,590		
Teak	0,860	Os	1,799 à 1,997
Tilleul	0,604	Cartilage	1.088
Tremble, 20 p. 100 d'humidité	0,602	Cristallin	1,079
Moelle de sureau	0,076	Tendon	1,105 à 1,132
		Nerf	1,040
CHARBON DE BOIS.		Beurre	0,942
		Graisse de mouton	0,924
1° *En poudre.*		— de porc	0,937
		Laine	1,614
Aune	1,49	Cire	0,963
Chêne	1,53	Blanc de baleine	0,943
Peuplier	1,45	Perles	2,684 à 2,750
Saule	1,55	Corail	2,689
Tilleul	1,46	Corps humain (densité moyenne)	1,066

LIQUIDES.

	Densités.		Densités.
Acétal pur	0,844	Acide acétique monohydraté	1,063
Acétone	0,792	— azoteux	1,550
Acide acét. au maxim. de densité	1,079	— azotique fumant	1,451

LIQUIDES (*Suite*).

	Densités.		Densités.
Acide azotique quadrihydraté. .	1,42	Essence d'amandes amères. . .	1,043
— — du commerce. . .	1,22	— de cannelle.	1,010
— hypoazotique.	1,451	— de citron.	0,847
— butyrique.	0,963	— de cumin.	0,969
— cyanhydrique.	0,697	— de térébenthine.	0,861
— chlorhydrique concentré.	1,208	Éther.	0,730
— formique.	1,117	— acétique.	0,890
— lactique très concentré. .	1,22	— azoteux.	0,886
— oléique.	0,898	— azotique.	1,112
Acide sulfurique au maximum de concentration. SO^3, HO. . . .	1,841	— chlorhydrique.	0,874
		— benzoïque.	1,054
Acide sulfur. concentré dans les chaudières en plomb, environ.	1,75	— formique.	0,915
		— oxalique.	1,093
Acide sulfur. sortant des chaudières en plomb.	1,35 à 1,50	— sulfureux.	1,085
		— sulfurique.	0,715
Acide hyposulfurique.	1,347	Huile de lin.	0,94
Alcool absolu.	0,795	— de naphte ou pétrole. . .	0,84
Alcool au maximum de densité (hyd. de Rudberg).	0,927	— de navette.	0,919
		— d'olive.	0,915
Alcool du commerce.	0,84	— de pavot.	0,93
Esprit de bois.	0,978	— de pomme de terre. . . .	0,818
Aldhéhyde.	0,790	— de Spiræa.	1,173
Benzine.	0,85	Lait.	1,03
Bitume liquide, dit naphte. . . .	0,847	Liqueur des Hollandais.	1,280
Brome.	2,966	Mercaptan.	0,842
Chloroforme.	1,525	Mercure à 0°.	13,596
Chlorure d'azote.	1,653	Protochlorure de soufre.	1,680
— de silicium.	1,52	Sulfure de carbone.	1,263
Eau distillée.	1,000	Vin de Bordeaux.	0,994
— de la mer (en moyenne). . .	1,026	— de Bourgogne.	0,991

DENSITÉS de quelques gaz à 0° et sous la pression $0^m,76$, celle de l'air étant 1.

	Densités.		Densités.
Air à 0° et $0^m,76$ (mélange de 20,8 d'oxyg. et 79,2 d'azote, en vol.).	1,000	Chlore.	2,47
		Chlorure de bore.	3,942
Acide bromhydrique.	2,731	— de cyanogène. . . .	2,124
Acide carbonique, d'après M. Regnault.	1,52901	— de méthyle.	1,731
		Cyanogène.	1,806
Acide chlorhydrique.	1,247	Fluorure de bore.	2,312
— chloroborique.	3,420	— de silicium.	3,573
— chlorocarbonique. . . .	3,399	Hydrogène, d'après M. Regnault.	0,06926
— fluoborique.	2,371	— arsénié.	2,695
— fluosilicique.	3,573	Hydrogène protocarboné (gaz des marais).	
— formique.	1,235		0,556
— hypochloreux de Balard. .	2,980	Hydrog. bicarboné (gaz oléfiant).	0,985
— iodhydrique.	4,433	Hydrogène phosphoré.	1,214
— sélénhydique.	2,795	Méthylène.	0,490
— sulfhydrique.	1,191	Fluorhydrate de méthylène. . .	1,186
— sulfureux.	2,234	Molybdate de méthylène. . . .	1,617
— tellurhydrique.	4,490	Oxygène, d'après M. Regnault. .	1,10563
Ammoniaque.	0,596	Oxyde de carbone.	0,967
Azote, d'après M. Regnault. . .	0,97137	Oxyde de chlore ou acide hypochlorique.	
Protoxyde d'azote.	1,527		2,340
Bioxyde d'azote.	1,039	Oxyde de méthyle.	1,617

POIDS du litre de quelques gaz à 0° et sous la pression de $0^m,76$, d'après M. Regnault.

	Grammes.		Grammes.
Acide carbonique.	1,977414	Oxygène.	1,429802
Air.	1,293187	Hydrogène.	0,089578
Azote.	1,256167		

DENSITÉS de quelques vapeurs ramenées par le calcul à 0° et à la pression 0m,76, celle de l'air à 0° et à la pression 0m,76 étant 1.

Acétate de méthyle.	2,563	Esprit de bois.	1,120
Acétone.	2,019	Essence d'amandes amères.	3,708
Acide acétique anhydre.	3,471	— de cannelle.	4,62
— — monohydraté.	2,083	— de cumin.	5,20
— arsénieux.	13,850	— de térébenthine.	4,763
— azotique quadrihydraté.	1,270	Éther.	2,565
— hypo-azotique.	1,720	— acétique.	3,067
— benzoïque.	4,270	— benzoïque.	5,409
— butyrique.	3,072	— formique.	2,48
— chlorocyanique.	2,122	— hydriodique.	5,474
— cyanhydrique.	0,947	— hydrochlorique.	2,219
— fluoborique.	2,312	— oxalique.	5,087
— formique.	1,582	— sulfurique.	2,586
— sélénieux.	4,030	Formiate de méthyle.	2,083
— sulfurique anhydre.	3,000	Huile de pomme de terre.	3,147
— valérique.	3,559	Hydrobicarbonate de chlore.	3,443
Air.	1,000	Hydrogène arséniqué.	2,695
Alcool.	1,601	Hydrure de salycille.	4,27
Aldéhyde	1,532	Iode.	8,716
Arsenic.	10,600	Iodure d'arsenic.	16,10
Benzine.	2,77	Liqueur des Hollandais.	3,45
Benzoate de méthyle.	4,751	Mercaptan.	2,326
Bibromure de mercure.	12,16	Mercure.	6,976
Bichlorure d'étain.	9,199	Naphtaline.	4,528
Bichlorure de mercure.	9,80	Nitreuse.	3,180
Biiodure de mercure.	15,60	Oxyde de cacodyle.	7,55
Bisulfhydrate d'ammoniaque.	0,90	Phosphore.	4,420
Brome.	5,540	Perchlorure de phosphore.	3,66
Bromure de cyanogène.	3,61	— de titane.	6,856
Cacodyle.	7,10	Peroxychlorure de chrome.	5,90
Camphre.	5,468	Protobromure de mercure.	10,14
Carbone.	0,846	Protochlorure d'antimoine.	7,8
Chlorhydrate d'ammoniaque.	0,93	— de bismuth.	11,1
Chlorure d'arsenic.	6,30	Protochlorure de mercure (sublimé corrosif).	9,80
— de bore.	3,942	Sous-chlorure de mercure (calomel).	8,35
— de cacodyle.	4,56	Sous-chlorure de phosphore.	4,742
— de silicium.	5,939	Salicylate de méthyle.	5,421
— de soufre jaune.	4,70	Soufre.	2,21
— — rouge.	3,70	Sulfate de méthylène.	4,565
— solide de cyanogène.	6,39	Sulfhydrate d'ammoniaque.	1,18
Cumène.	3,96	Sulfure de carbone.	2,644
Cyanhydrate d'ammoniaque.	0,77	— de mercure (cinabre).	5,5
Cyanure de cacodyle.	4,63		
Eau (d'après Gay-Lussac).	0,6235		

Dans la pratique, on peut admettre que la densité de la vapeur d'eau, à une pression quelconque, est les 4/5 de celle de l'air, à la même température et à la même pression.

466. *Tableau du poids d'un mètre cube de divers corps dont les densités n'ont pu être déterminées d'une manière aussi précise que pour les précédents.*

Poncelet, *Introduction à la mécanique industrielle.*

DÉSIGNATION DES SUBSTANCES.	POIDS du mètre cube	DÉSIGNATION DES SUBSTANCES.	POIDS du mètre cube.
Pierre à plâtre ordinaire.	2168 kil.	Sable terreux.	1700 kil.
Gypse ou plâtre fin.	2264	Terre végétale légère.	1400
Pierre meulière.	2484	Terre argileuse.	1600
Marbre noir et blanc.	2717	Terre glaise.	1900
Briques { les plus cuites.	2200	Maçonnerie de moellons ordinaires, de 1700 kil. à.	2300
Briques { les moins cuites.	1500		
Tuiles ordinaires.	2000	Chêne le plus pesant, le cœur.	1170
Sable pur.	1900	Chêne le plus léger, sec.	850

Génieys, *Recueil de tables.*

DÉSIGNATION DES SUBSTANCES.	POIDS du mètre cube. de	à
1° *Substances d'origine minérale.*	kil.	kil.
Eau... distillée et de pluie	»	1000
Eau... de rivière, environ	»	1000
Eau... de puits	1000	1014
Eau... de mer	1028	1042
Terre ou sable de bruyère	614	643
Terreau	828	857
Tourbe. sèche	514	»
Tourbe. humide	785	»
Terre végétale	1214	1285
Terre forte graveleuse	1357	1428
Vase	1642	»
Argile et glaise	1656	1756
Marne	1571	1642
Sable.. fin et sec	1399	1428
Sable.. fin et humide	1900	»
Sable.. fossile argileux	1713	1799
Sable.. de rivière humide	1771	1856
Gravier cailloutis	1371	1485
Grosse terre mêlée de sable et de gravier	1860	»
Terre mêlée de petites pierres	1910	»
Argile mêlée de tuf	1990	»
Terre grasse mêlée de cailloux	2290	»
Écalins de roches	1571	1713
Ciment de terre cuite	1171	1228
Mâchefer, scories de forges	771	985
Laitier vitreux	1428	1485
Pouzzolane...... d'Italie	1157	1228
Pouzzolane...... du Vivarais	1085	1128
Trass de Hollande ou trass d'Andernach	1071	1085
Pierre ponce	557	928
Chaux......... vive sortant du four	800	857
Chaux......... éteinte, en pâte ferme	1328	1428
Mortier de chaux et de sable	1856	2142
Mortier de chaux et de ciment	1656	1713
Mortier de chaux et de mâchefer	1128	1214
Mortier de chaux et de laitier	1856	1942
Brique	1000	1471
Ardoises, environ	2600	»
Craie	1214	1285
Pierre à bâtir..... tendre	1142	1713
Pierre à bâtir..... franche demi-roche	1713	1999
Pierre à bâtir..... liais doux et roche	2142	2284
Pierre à bâtir..... roches dures, liais	2284	2427
Pierre à bâtir..... très compacte, cliquart	2499	2713
Albâtres, marbres, brèches, lumachelles, brocatelles	2199	2870
Chaux fluatée, spath fluor	3084	3184
Chaux fluatée calcarifère, gypse ou pierre à plâtre crue et alabastrite	1899	2299
Plâtre cuit battu	1199	1228
Id. tamisé	1242	1257
L'eau pour gâcher pèse	328	343
Plâtre gâché humide	1571	1599
Id. sec	1399	1414
L'eau vaporisée pèse	171	186

DÉSIGNATION DES SUBSTANCES.	POIDS du mètre cube de	POIDS du mètre cube à
	kil.	kil.
L'eau combinée par cristallisation pèse	157	157
Pierre à ciment de Vassy	2500	»
Plâtre cuit passé au panier	1200	1270
L'eau pour le gâcher pèse	397	415
Plâtre gâché, vingt-quatre heures après l'emploi	1577	1600
Plâtre gâché, deux mois après l'emploi	1390	1410
Maçonnerie fraiche, en. . moellons	2230	2250
Maçonnerie fraiche, en. . brique	1860	1890
Baryte	4284	4626
Quartz, pierre meulière poreuse	1242	1285
Quartz, pierre meulière compacte écailleuse	2485	2613
Quartz hyalin	2642	2656
Quartz arénacé ou grès à bâtir	1928	2070
id. à paveur	2427	2613
Quartz résinite pechstein ou pierre de poix	2042	2656
Quartz ou silex pyromaque, pouding	2570	2927
Jaspe	2356	2813
Feldspath, pétrosilex	2570	2742
Trapp, cornémie, pierre de touche	2699	2742
Porphyre, ophile, serpentine variolite	2756	2927
Talc, stéatite, chlorite	2613	2784
Serpentine	2770	2856
Pierre ollaire	2742	2856
Granit, siénite, gneiss	2356	2956
Granitelle	2799	3056
Mica	2570	2927
Amiante	1556	1785
Schiste. grossier	1813	2784
Schiste. tégulaire, ardoise	2742	2856
Trématode, pierre de Volvic	1928	2642
Laves, lithoïdes, basaltes	2756	3056
Laves du Vésuve	1713	2813
Tufs volcaniques	1214	1385
Scories volcaniques	785	885
Houille, charbon de terre	942	1328
2° *Métaux*.		
Or à 24 karats, fondu, forgé	»	19065
Argent à 12 deniers, fondu, forgé	»	11494
Platine passé à la filière	»	21039
Cuivre. rouge fondu	»	7783
Cuivre. — passé à la filière	»	8540
Cuivre. jaune passé à la filière	»	8540
Fer. fondu	»	7202
Fer. forgé	»	7783
Acier. non trempé	»	7829
Acier. écroui, trempé	»	7813
Étain. pur de Cornwall, fondu	»	7287
Étain. neuf, fondu, écroui	»	7307
Étain. fin, fondu, écroui	»	7515
Étain. commun, fondu	»	7915
Étain. dit *clair étoffe*, fondu	»	8439
Fonte blanche	»	7500
id. grise	»	7200
id. noire	»	7260
Plomb fondu	»	11346

DÉSIGNATION DES SUBSTANCES.	POIDS du mètre cube de	à
	kil.	kil.
Zinc fondu.	»	7188
Mercure coulant.	»	13560
3° Carreaux de plâtras et plâtre.	Un carreau humide.	sec.
Pour cloisons légères, 0m,487 sur 0m,325 et 0m,0677 d'épaisseur.	15	12
0 ,0812 *id.*	18	15
0 ,0947 *id.*	21	17
0 ,1083 *id.*	23	20
Long. Larg. Épais.	Le cent de compte.	
Briques de Bourgogne. . . 0m,226 0m,108 0m,054	241	428
Briques de Montereau. . . 0 ,217 0 ,108 0 ,050	208	214
Briques de Sarcelles. . . . 0 ,210 0 ,088 0 ,047	180	184
Brique flottante composée de farine volcanique. . . . . . . 0 ,189 0 ,115 0 ,045	44	»
Ardoise carrée forte.	45	47
id. *id.* fine.	36	38
id. cartelette.	22	23
Le mètre carré de voliges employé en couverture.	5	5,3
Tuiles de Bourgogne, grand moule de 0m,298 sur 0m,244 et 0,0135.	223	225
Tuiles de Bourgogne, grand moule faîtières de 0m,352.	379	385
id. petit moule de 0m,244 sur 0,162 et 0,014	159	162
id. petit moule faîtières de 0m,352.	328	330
Tuiles de Sarcelles, de 0m,257 sur 0,162 et 0,018.	112	116
id. faîtières de 0m,325.	»	245
Carreaux de 0m,162, à six pans, de Bourgogne.	84	»
Carreaux de 0m,162, à six pans, de Sarcelles.	74	»
4° Bois.		
Abricotier.	771	»
Acacia (faux).	785	800
Alisier.	871	885
Acajou.	785	914
Amandier.	1000	»
Arbre de Judée.	685	»
Aune.	510	800
Bouleau commun	700	714
id. mérisier.	571	»
Catalpa.	457	471
Cèdre du Liban.	557	600
id. des Indes.	1314	»
Cerisier commun.	714	743
id. de Sainte-Lucie.	857	871
Charbon de bois.	330	»
Charme.	757	»
Châtaignier.	685	1100
Chêne vert.	930	1220
Chêne sec.	643	1015
Cognassier.	700	985
Cormier.	900	914
Coudrier noisetier.	600	»
Cyprès pyramidal.	600	657
id. étalé.	571	»
Ébénier des Alpes.	1042	»
id. d'Amérique.	1199	1328

DÉSIGNATION DES SUBSTANCES.	POIDS du mètre cube.	
	de	à
	kil.	kil.
Érable sycomore	643	»
id. de Virginie	628	757
id. jaspé	543	557
Févier épineux	814	828
id. sans épines	771	785
Frêne	785	»
Gaïac	1328	1342
Genévrier	543	557
If de Hollande	771	»
If d'Espagne	814	»
Laurier d'Espagne	814	828
Marronnier	657	»
Mélèze	657	»
Néflier	942	»
Noyer de France	600	685
Noyer d'Afrique	728	743
Olivier	914	928
Orme	743	942
Osier	543	»
Peuplier d'Italie	371	414
id. de Hollande	528	614
Pin du Nord	814	828
Platane d'Orient	700	714
id. d'Occident	628	»
Poirier	600	714
Pommier	757	800
Prunier	711	790
Sapin abies	460	»
id. épicéa	528	557
id. jaune aurore	671	»
Saule	571	585
Sorbier des oiseleurs	743	»
Sureau	685	700
Sycomore	640	»
Tilleul	557	600
Tulipier	471	485
Thuya de la Chine	557	571
Aylande, dit *vernis du Japon*	814	828
Vigne	1314	1328
Cordes en chanvre, environ	915	»

POUVOIRS DES CORPS POUR LA CHALEUR

467. Pouvoir émissif ou rayonnant. Pouvoirs absorbant et réfléchissant. Tous les corps, quelles que soient leur nature et leur température, jouissent de la propriété d'émettre ou de rayonner de la chaleur. Chaque rayon émané se meut en ligne droite, et son intensité en un point quelconque varie, pour une même source de chaleur, en raison inverse du carré de la distance de ce point à la source. La chaleur rayonnée traverse l'air sans l'échauffer. La quantité plus ou moins grande de chaleur émise ou rayonnée par un corps est ce qu'on appelle le *pouvoir émissif ou rayonnant* de ce corps.

Lorsqu'un corps poli est rencontré par un rayon de chaleur, il en

absorbe une partie et réfléchit l'autre. La proportion plus ou moins grande de chaleur absorbée est ce qu'on appelle le *pouvoir absorbant* de ce corps, et la portion réfléchie est son pouvoir *réfléchissant.*

La température d'un corps restant constante, c'est que la quantité de chaleur qu'il émet est égale à la quantité de chaleur qu'il absorbe; d'où il résulte que *le pouvoir émissif d'un corps est égal à son pouvoir absorbant.* De plus, *le pouvoir réfléchissant est le complément du pouvoir absorbant et du pouvoir émissif.*

Ainsi le pouvoir émissif d'un corps étant 90, par exemple, son pouvoir absorbant sera 90, et si son pouvoir réfléchissant est 10, ces nombres 90 et 10 exigent que la quantité totale de chaleur qui vient frapper le corps soit représentée par 100. Pour le noir de fumée, le pouvoir réfléchissant étant sensiblement nul, ses pouvoirs absorbants et émissifs ou rayonnants sont 100. C'est le maximum du pouvoir émissif et absorbant.

Tableau des pouvoirs émissifs ou absorbants et des pouvoirs réfléchissants, d'après Leslie pour l'eau et la glace, d'après Melloni pour les autres corps non métalliques, et d'après les expériences de de La Provostaye et P. Desains pour les métaux.

SUBSTANCES.	POUVOIRS émissifs ou absorbants.	POUVOIRS réfléchissants.
Noir de fumée	100	0
Eau	100	0
Carbonate de plomb	100	0
Papier à écrire	98	2
Ivoire, jais, marbre	93 à 98	7 à 2
Colle de poisson	91	9
Verre ordinaire	90	10
Encre de Chine	85	15
Glace	85	15
Gomme-laque	72	28
Feuille d'argent sur verre	27	73
Fonte avec le meilleur poli	25	75
Mercure, environ	23	77
Fer poli	23	77
Zinc poli	19	81
Acier poli	17	83
Platine déposé en couche épaisse, peu poli	24	76
Platine chimiquement déposé sur cuivre	17	83
Platine en lame	17	83
Métal des miroirs un peu altéré	17	83
Id. récemment poli	14	86
Étain	15	85
Laiton fondu, poli gras	11	89
Id. battu, poli gras	9	91
Id. battu, poli vif	7	93
Id. fondu, poli vif	7	93
Cuivre rouge verni	14	86
Id. déposé sur fer	7	93
Id. battu ou fondu	7	93
Or plaqué	5	95
Or déposé sur acier poli	3	97
Argent battu, bien poli	3	97
Id. fondu, bien poli	3	97

D'après de La Provostaye et P. Desains, les pouvoirs réfléchissants des métaux ne paraissent pas changer avec l'incidence pour des angles inférieurs à 70 degrés; mais pour des angles supérieurs ils diminuent sensiblement; ainsi, pour les angles de 75 ou 80 degrés, ils deviennent à peu près les 0,94 de ce qu'ils étaient sous des incidences plus petites. Il a été impossible d'observer avec précision pour des incidences plus rasantes, de sorte qu'on ne peut pas dire si la diminution continue jusqu'à 90 degrés.

Le pouvoir absorbant varie avec la nature de la source, avec l'état physique de la substance, avec l'inclinaison des rayons incidents.

Le pouvoir absorbant d'une surface métallique est d'autant plus petit, et par suite son pouvoir réfléchissant est d'autant plus grand, que cette surface est mieux polie.

Tableau des pouvoirs absorbants de quelques métaux, déduits des pouvoirs réfléchissants pour des incidences comprises entre 0° et 70°, pour diverses sources de chaleur.

MÉTAUX.	SOURCES DE CHALEUR.				
	Solaire.	Lampe à modérateur.	Lampe Locatelli.	Lampe à alcool salé.	Obscure, cuivre à 400°.
Acier	42	34	17,5	12	»
Métal des miroirs	34	30	14,5	»	»
Platine	39	30	17	14	10,5
Zinc	»	32	19	»	»
Etain	»	32	15	»	»
Laiton	»	16	7	6	5,5
Or	13	»	4,5	»	4,5
Argent plaqué très brillant	8	3,5	2,5	»	»

Pouvoirs réfléchissants du verre sous diverses incidences, pour la chaleur d'après de La Provostaye et P. Desains, et pour la lumière d'après Jamin.

Angle d'incidence	80°	75°	70°	60°	50°	40°	30	20°
Chaleur réfléchie	55,4	40,7	30,6	17,9	11,6	8,0	6,1	5,0
Lumière	54,6	40,8	30,8	18,3	11,7	8,1	6,1	5,0

Ce tableau montre que les proportions de chaleur et de lumière réfléchies sont les mêmes.

468. Transparence des corps pour la chaleur. L'air, l'eau et la glace se laissent traverser par la chaleur, et il en est de même d'un assez grand nombre d'autres corps gazeux, liquides ou solides, que pour cette raison on qualifie de *diathermanes*.

Tableau de la chaleur transmise à travers des lames de 0m,0026 d'épaisseur, d'après les expériences de Melloni, la chaleur incidente étant représentée par 100.

SUBSTANCES.	SOURCES DE CHALEUR.		
	Lampe Locatelli.	Platine incandescent.	Cuivre à 400°.
Sel gemme.	92	92	92
Fluorine.	72	69	33
Spath d'Islande.	39	28	0
Verre (suivant les espèces).	39 à 66	»	»
Cristal de roche.	38	28	3
Eau.	13	2	0
Alun.	9	2	0
Glace.	6	0,5	0

Chaleur transmise à travers une lame d'eau de 0m,05 d'épaisseur, d'après les expériences de La Provostaye et P. Desains.

Chaleur solaire totale.	58
Chaleur solaire obscure prise en dehors du rouge du spectre.	14
Chaleur solaire plus éloignée.	0
Chaleur solaire ayant déjà traversé 0m,25 d'eau.	92
Chaleur des charbons rendus incandescents par une forte pile.	24
Chaleur de la craie exposée au chalumeau d'oxygène et de vapeur d'éther.	20
Chaleur de la lampe de Locatelli ou de celle d'Argand à cheminée.	10
Chaleur de la lampe à alcool salé.	2
Chaleur de la lampe d'Argand qui a traversé une lentille de 0m,10 d'eau.	51

469. Pouvoir conducteur des corps pour la chaleur. Tous les corps ne conduisent pas également bien la chaleur; c'est ce que fait voir le tableau suivant des pouvoirs conducteurs relatifs de quelques corps, d'après Despretz, et d'après les expériences de MM. Wiedemann et Franz.

DÉSIGNATION des corps.	POUVOIRS RELATIFS.		DÉSIGNATION des corps.	POUVOIRS RELATIFS.	
	Despretz.	MM. Wiedemann et Franz.		Despretz.	MM. Wiedemann et Franz.
Or.	1000,0	1000	Zinc.	363,0	»
Platine.	981,0	158	Etain.	303,9	273
Argent.	973,0	1880	Plomb.	179,5	160
Cuivre.	898,2	1383	Marbre.	23,6	»
Laiton.	748,6	444	Porcelaine.	12,2	»
Fonte.	561,5	»	Terre cuite.	11,4	»
Fer.	374,3	224	Palladium.	»	118
Acier.	»	218	Bismuth.	»	34

Lorsqu'un corps conduit bien la chaleur, il prend le nom de *bon conducteur de la chaleur;* si au contraire il la conduit mal, il prend le nom de *mauvais conducteur de la chaleur.*

Les corps composés de fibres très fines, comme le coton, la laine, l'édredon, la ouate, le son, la paille, le charbon très divisé, sont les plus mauvais conducteurs de la chaleur. Les liquides et les gaz sont aussi de mauvais conducteurs de la chaleur; aussi lorsqu'on veut les échauffer, faut-il avoir recours à l'échauffement par contact en produisant des courants dans ces matières; ce que du reste on obtient naturellement en plaçant le foyer sous les liquides ou les gaz à échauffer. Si l'on gêne les mouvements des liquides ou des gaz au moyen de corps fibreux, l'échauffement est considérablement retardé.

ÉVALUATION DES TEMPÉRATURES

470. Thermomètres. Ces instruments, fondés sur les variations de volume que font subir aux corps les changements de température, servent à apprécier l'état de chaleur dans lequel se trouvent les corps.

Dans le *thermomètre centigrade*, le nombre 0° de l'échelle correspond à la température constante de la glace fondante, et le nombre 100°, à la température, aussi constante, de l'ébullition de l'eau pure sous la pression atmosphérique de $0^m,76$ de mercure. Chaque division du thermomètre représente 1 degré centigrade.

Dans le *thermomètre de Réaumur*, 0° correspond à la glace fondante, et 80° à l'eau bouillante.

Dans le *thermomètre Fahrenheit*, 32° correspond à la glace fondante, et 212° à l'ébullition de l'eau. Le zéro correspond au degré de froid qu'on obtient en mélangeant des poids égaux de sel ammoniac et de glace pilée.

Les relations qui existent entre les températures indiquées par ces différents thermomètres sont :

$$C = \frac{5}{4}R, \quad C = \frac{5}{9}(F - 32) \quad \text{et} \quad R = \frac{4}{9}(F - 32).$$

C	température en	degrés	centigrades;
R	*id.*	*id.*	Réaumur;
F	*id.*	*id.*	Fahrenheit.

De ces formules on conclut les résultats du tableau suivant :

NOMBRES de degrés Réaumur ou Fahrenheit.	TEMPÉRATURES en degrés centigrades, les nombres de la première colonne exprimant des degrés		NOMBRES de degrés Réaumur ou Fahrenheit.	TEMPÉRATURES en degrés centigrades, les nombres de la première colonne exprimant des degrés	
	Réaumur.	Fahrenheit.		Réaumur.	Fahrenheit.
	deg. cent.	deg. cent.		deg. cent.	deg. cent.
−28	−35,00	−33,33	+20	+25,00	− 6,67
27	33,75	32,78	21	26,25	6,11
26	32,50	32,22	22	27,50	5,56
25	31,25	31,67	23	28,75	5,00
24	30,00	31,11	24	30,00	4,45
23	28,75	30,56	25	31,25	3,90
22	27,50	30,00	26	32,50	3,34
21	26,25	29,45	27	33,75	2,78
20	25,00	28,89	28	35,00	2,23
19	23,75	28,34	29	36,25	1,67
18	22,50	27,78	30	37,50	1,11
17	21,25	27,23	31	38,75	0,56
16	20,00	26,67	32	40,00	0,00
15	18,75	26,12	33	41,25	+ 0,56
14	17,50	25,56	34	42,50	1,11
13	16,25	25,01	35	43,75	1,67
12	15,00	24,45	36	45,00	2,23
11	13,75	23,90	37	46,25	2,78
10	12,50	23,34	38	47,50	3,34
9	11,25	22,79	39	48,75	3,90
8	10,00	22,22	40	50,00	4,45
7	8,75	21,67	41	51,25	5,00
6	7,50	21,11	42	52,50	5,56
5	6,25	20,56	43	53,75	6,11
4	5,00	20,00	44	55,00	6,67
3	3,75	19,45	45	56,25	7,23
2	2,50	18,89	46	57,50	7,78
1	1,25	18,34	47	58,75	8,34
0	0,00	17,78	48	60,00	8,89
+ 1	+ 1,25	17,23	49	61,25	9,45
2	2,50	16,67	50	62,50	10,00
3	3,75	16,11	51	63,75	10,50
4	5,00	15,56	52	65,00	11,11
5	6,35	15,00	53	66,25	11,67
6	7,50	14,45	54	67,50	12,23
7	8,75	13,90	55	68,75	12,78
8	10,00	13,34	56	70,00	13,34
9	11,25	12,78	57	71,25	13,90
10	12,50	12,23	58	72,50	14,45
11	13,75	11,67	59	73,75	15,00
12	15,00	11,11	60	75,00	15,56
13	16,25	10,56	61	76,25	16,11
14	17,50	10,00	62	77,50	16,67
15	18,75	9,45	63	78,75	17,23
16	20,00	8,89	64	80,00	17,78
17	21,25	8,34	65	81,25	18,34
18	22,50	7,78	66	82,50	18,89
19	23,75	7,23	67	83,75	19,45

NOMBRES de degrés Réaumur ou Fahrenheit.	TEMPÉRATURES en degrés centigrades, les nombres de la première colonne exprimant des degrés Réaumur.	Fahrenheit.	NOMBRES de degrés Réaumur ou Fahrenheit.	TEMPÉRATURES en degrés centigrades, les nombres de la première colonne exprimant des degrés Réaumur.	Fahrenheit.
	deg. cent.	deg. cent.		deg. cent.	deg cent.
+68	+ 85,00	+20,00	+115	+143,75	+46,11
69	86,25	20,56	116	145,00	46,67
70	87,50	21,11	117	146,25	47,23
71	88,75	21,67	118	147,50	47,78
72	90,00	22,23	119	148,75	48,34
73	91,25	22,78	120	150,00	48,90
74	92,50	23,34	121	151,25	49,45
75	93,75	23,90	122	152,50	50,00
76	95,00	24,45	123	153,75	50,56
77	96,25	25,00	124	155,00	51,11
78	97,50	25,56	125	156,25	51,67
79	98,75	26,12	126	157,50	52,23
80	100,00	26,67	127	158,75	52,78
81	101,25	27,23	128	160,00	53,34
82	102,50	27,78	129	161,25	53,90
83	103,75	28,34	130	162,50	54,45
84	105,00	28,89	131	163,75	55,00
85	106,25	29,45	132	165,00	55,56
86	107,50	30,00	133	166,25	56,11
87	108,75	30,56	134	167,50	56,67
88	110,00	31,11	135	168,75	57,23
89	111,25	31,67	136	170,00	57,78
90	112,50	32,22	137	171,25	58,34
91	113,75	32,78	138	172,50	58,90
92	115,00	33,33	139	173,75	59,45
93	116,25	33,89	140	175,00	60,00
94	117,50	34,45	141	176,25	60,56
95	118,75	35,00	142	177,50	61,11
96	120,00	35,56	143	178,75	61,67
97	121,25	36,11	144	180,00	62,23
98	122,50	36,67	145	181,25	62,78
99	123,75	37,23	146	182,50	63,34
100	125,00	38,78	147	183,75	63,90
101	126,25	38,34	148	185,00	64,45
102	127,50	38,90	149	186,25	65,00
103	128,75	39,45	150	187,50	65,56
104	130,00	40,00	151	188,75	66,11
105	131,25	40,56	152	190,00	66,67
106	132,50	41,11	153	191,25	67,23
107	133,75	41,67	154	192,50	67,78
108	135,00	42,23	155	193,75	68,34
109	136,25	42,78	156	195,00	68,90
110	137,50	43,34	157	196,25	69,45
111	138,75	43,90	158	197,50	70,00
112	140,00	44,45	159	198,75	70,56
113	141,25	45,00	160	200,00	71,11
114	142,50	45,56			

TEMPÉRATURES en degrés		TEMPÉRATURES en degrés		TEMPÉRATURES en degrés		TEMPÉRATURES en degrés	
Fahrenh.	centigrades.	Fahrenh.	centigrades.	Fahrenh.	centigrades.	Fahrenh.	centigrades.
+161	+71.67	+219	+103,90	+277	+136,11	+335	+168,34
162	72,23	220	104,45	278	136,67	336	168,90
163	72,78	221	105,00	279	137,23	337	169,45
164	73,34	222	105,56	280	137,78	338	170,00
165	73,90	223	106,11	281	138,34	339	170,56
166	74,45	224	106,67	282	138,90	340	171,11
167	75,00	225	107,23	283	139,45	341	171,67
168	75,56	226	107,78	284	140,00	342	172,23
169	76,11	227	108,34	285	140,56	343	172,78
170	76,67	228	108,90	286	141,11	344	173,34
171	77,23	229	109,45	287	141.67	345	173,90
172	77,78	230	110,00	288	142,23	346	174,45
173	78,34	231	110,56	289	142,78	347	175,00
174	78,90	232	111,11	290	143,34	348	175,56
175	79,45	233	111,67	291	133,90	349	176,11
176	80,00	234	112,23	292	144,45	350	176,67
177	80,56	235	112,78	293	145,00	351	177,23
178	81,11	236	113,34	294	145,56	352	177,78
179	81,67	237	113,90	295	146.11	353	178,34
180	82,23	238	114,45	296	146.67	354	178,90
181	82,78	239	115,00	297	147,23	355	179,45
182	83,34	240	115,56	298	147,78	356	180.00
183	83,90	241	116,11	299	148.34	357	180,56
184	84,45	242	116,67	300	148,90	358	181,11
185	85,00	243	117,23	301	149,45	359	181,67
186	85,56	244	117,78	302	150,00	360	182,23
187	86,11	245	118,34	303	150,56	361	182,78
188	86,67	246	118,90	304	151,11	362	183,34
189	87,23	247	119,45	305	151,67	363	183,90
190	87,78	248	120,00	306	152,23	364	184,45
191	88,34	249	120,56	307	152,78	365	185,00
192	88,90	250	121,11	308	153 34	366	185,56
193	89,45	251	121,67	309	153,90	367	186,11
194	90,00	252	122,23	310	154,45	368	186,67
195	90,56	253	122,78	311	155,00	369	187,23
196	91,11	254	123,34	312	155,56	370	187,78
197	91,67	255	123,90	313	156,11	371	188,34
198	92,23	256	124,45	314	156,67	372	188,90
199	92,78	257	125,00	315	157,23	373	189,45
200	93,34	258	125,56	316	157,78	374	190,00
201	93,90	259	126,11	317	158,34	375	190,56
202	94,45	260	126,67	318	158,90	376	191,11
203	95,00	261	127,23	319	159,45	377	191,67
204	95,56	262	127,78	320	160,00	378	192,23
205	96,11	263	128,34	321	160,56	379	192,78
206	96,67	264	128.90	322	161.11	380	193,34
207	97,23	265	129,45	323	161,67	381	193,90
208	97,78	266	130,00	324	162,23	382	194,45
209	98,34	267	130,56	325	162,78	383	195,00
210	98,90	268	131,11	326	163.34	384	195,56
211	99,45	269	131,67	327	163,90	385	196,11
212	100,00	270	132,23	328	164,45	386	196,67
213	100,56	271	132,78	329	165,00	387	197,23
214	101,11	272	133,34	330	165,56	388	197,78
215	101,67	273	133,90	331	166,11	389	198,34
216	102,23	274	134,45	332	166,67	390	198,90
217	102,78	275	135,00	333	167,23	391	199,45
218	103,34	276	135,56	334	167,78	392	200,00

471. Les thermomètres à gaz présentent sur le thermomètre à mercure, et en général sur les thermomètres formés avec des substances solides et liquides, un avantage qui tient à la grandeur de la dilatation de la substance thermométrique. Dans un thermomètre quelconque formé par une substance liquide ou gazeuse, les indications de l'instrument dépendent de la dilatation de cette substance et de celle de l'enveloppe. Or la dilatation du mercure n'est guère que sept fois celle du verre qui le renferme; les variations que l'on remarque dans la loi de dilatation des différentes espèces de verre forment donc des fractions très sensibles des dilatations apparentes du mercure, et influent par suite d'une manière notable sur les indications de l'instrument. Dans le thermomètre à gaz, au contraire, la dilatation du gaz étant 160 fois celle du verre, les variations dans la loi de dilatation des diverses espèces de verre n'influent plus sensiblement sur les indications de l'appareil, et n'empêchent pas les instruments d'être comparables.

Le gaz d'un thermomètre peut se trouver dans des conditions telles que la pression soit constante et que son volume varie, ou que son volume soit constant et que sa pression varie.

Fig. 124.

Dans le premier cas (*fig.* 124) :

Le thermomètre à gaz est composé d'un réservoir A, qu'on place dans l'enceinte dont on veut connaître la température; d'un tube calibré *df*, réuni au réservoir A par un tube capillaire *ab* qui l'éloigne de l'enceinte; d'un tube *cd*, ouvert à sa partie supérieure, et par lequel on introduit du mercure dans l'appareil; enfin d'un robinet *r*, établissant à volonté la communication : 1° entre le tube *df* et l'atmosphère; 2° entre le bas du tube *cd* et l'atmosphère; 3° entre les deux tubes *df*, *cd*; 4° simultanément entre les tubes *df*, *cd* et l'atmosphère. La plaque de fonte *i*, qui relie les tubes et le robinet, porte deux pattes qui servent à fixer l'appareil contre une cloison pendant l'expérience.

Le tube calibré *df* remplit les fonctions de la tige divisée du thermomètre à mercure, et sert à recueillir le gaz que l'élévation de la température chasse du réservoir A; ce tube est d'ailleurs maintenu à une température constante peu différente de celle de l'air ambiant. A un moment quelconque de l'expérience, le gaz renfermé dans l'appareil se compose de deux parties : la première, qui occupe le réservoir A, se trouve à la température x; la seconde, recueillie dans le tube *df*, se trouve à la température ambiante t. Ces deux portions de gaz supportent la même pression, que l'on peut d'ailleurs rendre aussi rapprochée qu'on veut de la pression atmosphérique à l'aide du robinet r; on établit la communication simultanée entre les deux tubes *df*, *cd*, et avec l'atmosphère, de manière à faire écouler le mercure jusqu'à ce qu'il ait pris le même niveau dans les deux tubes.

Appelons :

V volume du réservoir A à la température 0°;

k le coefficient de dilatation cubique moyen du réservoir A depuis 0° jusqu'à la température à évaluer x;

α le coefficient de dilatation du gaz, que l'on suppose constant;

v le volume que l'air occupe dans le tube gradué df à la température t, quand le réservoir A est placé dans la glace fondante ;
v' le volume que l'air occupe dans df à la même température t quand le réservoir A est à la température x ;
H la force élastique du gaz en millimètres ; H sera égale à la pression atmosphérique si le mercure a le même niveau dans les deux tubes df, cd ;
H' la force élastique du gaz quand le réservoir A est à la température x ; à l'aide du robinet r, on pourra faire en sorte que H' diffère le moins possible de H ;
δ la densité du gaz à 0° et sous la pression de 760 millimètres.

Suivant que le réservoir A est à la température 0° ou à la température x, le poids du gaz contenu dans l'appareil est exprimé par :

$$\left(V + \frac{v}{1+\alpha t}\right)\delta \times \frac{H}{760} \quad \text{ou} \quad \left(V\frac{1+kx}{1+\alpha x} + v'\frac{1}{1+\alpha t}\right)\delta \times \frac{H'}{760}.$$

Ces deux poids étant nécessairement égaux, on a donc :

$$\left(V + \frac{v}{1+\alpha t}\right)\frac{H}{H'} = V\frac{1+kx}{1+\alpha x} + \frac{v'}{1+\alpha t}.$$

Équation qui permet de calculer x.

C'est cette disposition que Pouillet a employée comme pyromètre à air (473) ; mais Regnault a cru devoir la rejeter pour thermomètre à air. Elle présente un inconvénient très grave quand l'appareil est destiné à mesurer des températures élevées ; dans ce cas, la plus grande partie de l'air vient dans le tube calibré df, et il n'en reste plus qu'une portion très petite dans le réservoir A ; de sorte que la partie qui sort encore pour une nouvelle élévation de température est très petite, et se mesure difficilement dans le tube calibré avec une précision suffisante.

Si la température x s'élève de dx, le volume v' devient $v' + dv'$ et l'on déduit de l'équation précédente :

$$\frac{1}{V} \times \frac{1}{1+\alpha t} \times \frac{dv'}{dx} = \alpha\frac{1+kx}{(1+\alpha x)^2} - k\frac{1}{1+\alpha x}.$$

Ainsi dv', qui représente la sensibilité de l'appareil, varie à peu près en raison inverse du carré de $1 + \alpha x$.

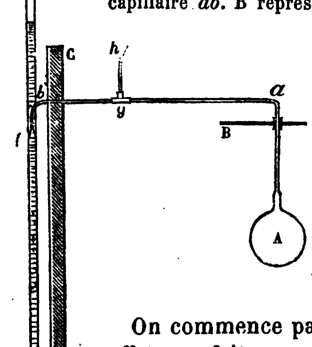
Regnault, dans ses recherches, a fait usage du thermomètre à air, dans lequel le volume du gaz est maintenu constant. La température est évaluée à l'aide de l'augmentation de force élastique du gaz, due à la dilatation qu'il aurait subie par suite de son accroissement de température, et cela en admettant la loi de Mariotte sur la compression des gaz (483). Ce thermomètre est plus commode que celui à pression constante, et il donne plus de précision ; de plus, il a l'avantage de présenter autant de sensibilité dans les hautes températures que dans les basses.

Si l'on veut mesurer des températures très élevées, par exemple si l'appareil doit servir comme pyromètre à air (473), la force élastique du gaz intérieur devenant très considérable, il est à craindre que l'enveloppe ne subisse une déformation permanente sous l'influence de cette grande pression intérieure. On remédie à cet inconvénient en introduisant dans l'appareil de l'air sous une pression initiale plus faible que

celle de l'atmosphère, lorsque le réservoir est à 0°. On peut, de cette manière, maintenir les forces élastiques entre des limites aussi resserrées qu'on le veut. Il est clair, d'ailleurs, que l'appareil devient d'autant moins sensible que la force élastique du gaz à 0° est plus faible; mais comme la mesure des forces élastiques se fait avec une précision extrême, les indications de l'appareil présentent encore une exactitude suffisante dans le plus grand nombre de cas, lors même que la pression initiale du gaz à 0° n'est que de 1/4 d'atmosphère.

Quoique la valeur absolue du coefficient de dilatation d'un gaz change très notablement avec sa densité, il résulte des expériences faites par Regnault que des thermomètres à gaz chargés avec des gaz de nature différente marchent d'accord entre eux lorsqu'ils ont été réglés pour des points fixes de 0° et de 100°.

Fig. 125.



La figure 125 représente la disposition employée par Regnault pour son thermomètre à gaz.

L'appareil se compose de deux tubes en verre *df*, *cd*, de 12 à 14 millimètres de diamètre intérieur, mastiqués dans une pièce de fonte *i* à robinet *r*, comme pour le thermomètre figure 124. Le tube *cd* est ouvert à sa partie supérieure, et celui *df* communique avec le ballon A par un tube capillaire *ab*. B représente le couvercle de la chaudière dont on veut évaluer la température. CD cloison en bois à laquelle est fixé le manomètre-thermomètre, et qui le sépare de la chaudière.

La réunion des deux parties du tube capillaire *ab* se fait en amenant les bouts en contact, et en mastiquant par-dessus les deux bouts, qui ont le même diamètre, une petite tubulure *g* en laiton qui passe exactement à frottement. Cette tubulure reçoit un troisième tube capillaire *h* qui sert à mettre l'appareil en communication avec une pompe pneumatique, au moyen de laquelle on peut dessécher l'appareil et y introduire le gaz.

On commence par dessécher complètement l'appareil. A cet effet, on fait passer un peu de mercure dans le tube *bd*, et l'on tourne le robinet *r* de manière qu'il n'y ait communication du tube *bd*, ni avec le tube *cd*, ni avec l'ouverture libre du robinet; puis on met le tube *h* en communication avec une pompe aspirante munie de plusieurs tubes remplis de pierre ponce imbibée d'acide sulfurique concentré, qui sont destinés à absorber l'humidité. On fait le vide un grand nombre de fois, et on laisse rentrer chaque fois l'air très lentement. Pour être sûr que la dessiccation est complète, on maintient le ballon chauffé à 50 ou 60 degrés. On sépare alors la pompe, mais en laissant le tube *h* en communication avec un tube desséchant.

Cela fait, on enveloppe le ballon A de glace fondante, on établit la communication entre les tubes *bd*, *cd*; on verse du mercure dans le manomètre, de façon à affleurer le sommet de la colonne à un trait de repère *f* tracé sur le tube *bd*, très près de son extrémité supérieure. Les deux colonnes de mercure se mettent de niveau, puisque l'appareil

communique avec l'atmosphère par le tube h. On ferme alors le tube h à la lampe.

Si l'on voulait que la pression dans l'appareil fût inférieure à l'atmosphère, on pomperait par le tube h, et d'après la différence de niveau dans les deux colonnes du manomètre on jugerait quand la raréfaction serait convenable; on fermerait alors l'appareil en fondant à la lampe le tube h, puis on verserait du mercure dans le manomètre de manière à affleurer le ménisque au repère f.

Soient :

H la pression atmosphérique;
h la différence de niveau du mercure dans les deux branches du manomètre quand le ballon A est dans la glace fondante;
$H - h$ la force élastique du gaz dans l'appareil;
V la capacité à 0° du ballon A et de la portion de tube capillaire qui sera dans la chaudière;
v le petit volume d'air contenu dans la portion bf du tube;
v' *id.* dans le tube ab et l'appendice gh ;
t la température indiquée par un thermomètre placé près de bf;
t' *id.* *id.* près de ab ;
t et t' doivent être les températures moyennes de l'air dans ces tubes, et dans la formule suivante on les suppose les mêmes avant et après l'expérience;
δ la densité de l'air à 0° et sous la pression de 760 millimètres;
α le coefficient de dilatation de l'air pour une force élastique initiale $H - h$;

le poids de l'air contenu dans le thermomètre a pour expression :

$$\left(V + \frac{v}{1+\alpha t} + \frac{v'}{1+\alpha t'}\right)\delta \times \frac{H-h}{760}.$$

Le ballon A étant placé dans la chaudière ou dans tout autre milieu dont on veut évaluer la température, appelant :

x la température à déterminer;
k le coefficient de dilatation du verre du ballon A;
H' la pression barométrique au moment où se termine l'expérience, H' ne peut différer de H que de très peu;
h' la différence de niveau du mercure dans les deux branches du manomètre;
$H' \pm h'$ la force élastique du gaz dans l'appareil. Le niveau du mercure devant être maintenu en f dans le tube bd, ce que l'on fait en introduisant du mercure dans le manomètre, h' s'ajoute à H' ou s'en retranche suivant que le niveau du mercure est au-dessus ou au-dessous du repère f dans le tube cd ;

le poids de l'air contenu dans l'appareil a alors pour expression :

$$\left(V\frac{1+kx}{1+\alpha x} + \frac{v}{1+\alpha t} + \frac{v'}{1+\alpha t'}\right)\delta \times \frac{H' \pm h'}{760}.$$

Le poids de l'air de l'appareil n'ayant évidemment pas changé, on a :

$$\left(V + \frac{v}{1+\alpha t} + \frac{v'}{1+\alpha t'}\right)(H-h) = \left(V\frac{1+kx}{1+\alpha x} + \frac{v}{1+\alpha t} + \frac{v'}{1+\alpha t'}\right)(H' \pm h'),$$

équation de laquelle on tire x.

Quand l'air est introduit à la pression atmosphérique H dans l'appareil, on fait $h = 0$, et l'on remplace $\pm h'$ par $+ h'$ dans les expressions et l'équation précédentes.

On conçoit qu'un second thermomètre à gaz placé à côté du premier, dans des conditions identiques, fournirait une formule semblable à la précédente, et donnerait pour x la même valeur que celle-ci, si les deux thermomètres sont comparables. C'est en opérant ainsi que Regnault a reconnu :

1° Que l'air atmosphérique suit la même loi de dilatation depuis 0° jusqu'à 300°, lors même que sa force élastique initiale à 0° varie depuis 0^{m},400 jusqu'à 1^{m},300 ; d'où il résulte que dans la construction d'un thermomètre à air on n'aura pas à se préoccuper de la densité de l'air introduit ; *les instruments seront comparables quelle que soit cette densité.*

2° L'air atmosphérique, l'hydrogène et l'acide carbonique possèdent, entre 0° et 350°, sensiblement la même loi de dilatation, bien que leurs coefficients de dilatation soient notablement différents. Ainsi des thermomètres construits avec ces différents gaz marcheront d'accord, pourvu qu'on calcule les températures avec le coefficient propre à chacun d'eux. Il résulte de là que les coefficients de dilatation de ces gaz présentent sensiblement le même rapport à toutes les températures.

3° Le gaz acide sulfureux s'écarte notablement de la loi de dilatation que présentent les gaz précédents. Le coefficient de dilatation de l'acide sulfureux diminue avec la température prise sur le thermomètre à air ; c'est ce que fait voir le tableau suivant, qui donne le coefficient moyen de dilatation par degré centigrade :

de 0° à	98°,12	0,0038251
id.	102°,45	0,0038225
id.	185°,42	0,0037999
id.	257°,17	0,0037923
id.	299°,90	0,0037913
id.	310°,31	0,0037893

Il est évident que la variation du coefficient de dilatation réel est encore plus grande que ne l'indique le tableau, qui donne les coefficients moyens toujours à partir de 0°.

Lorsqu'on n'a qu'une température à déterminer, on peut opérer ainsi qu'il suit avec le thermomètre à air.

472. On munit la tubulure g (*fig.* 125) d'un robinet semblable au robinet r. Établissant la communication de bg avec gh, on remplit le manomètre de mercure jusqu'au point g ; on intercepte cette communication, puis on établit la communication du ballon A avec gh, et l'on remplit ce ballon d'air sec. Cela fait, on place le ballon dans l'enceinte, de manière qu'une très petite portion de son tube capillaire, qui peut être droit suivant les circonstances, sorte de l'enceinte ; on laisse libre la communication du ballon avec le tube desséchant. Au moment où l'on veut déterminer la température, on supprime toute communication de gh avec A et le manomètre, et l'on observe le baromètre qui donne la pression atmosphérique à cet instant. On retire l'appareil et on le laisse revenir à la température ambiante.

On enveloppe le réservoir A et son tube capillaire de glace fondante, puis on fait couler le mercure du manomètre, de façon à avoir dans le tube df une dépression de 6 à 7 décimètres au-dessous du niveau ab ; on établit alors la communication entre le ballon A et le manomètre, une portion de l'air du ballon A passe dans le tube df. On verse du mercure dans le tube cd pour amener exactement le niveau au repère f marqué sur le tube bd. On mesure la différence des colonnes de mercure

du manomètre, et l'on observe de nouveau la hauteur du baromètre.

Appelant :

V la capacité du ballon et de son tube capillaire jusqu'à g à 0° ;
H la hauteur barométrique au moment de la fermeture du robinet g;
T la température de l'enceinte et du réservoir au moment de la fermeture du robinet g ;
v la capacité du tube capillaire gbf;
h la différence de hauteur des deux colonnes du manomètre quand l'air de l'appareil est ramené à 0° ;
H' la hauteur du baromètre à cet instant ;
t la température marquée par un thermomètre dans le voisinage du tube gbf;
k et α les coefficients de dilatation de l'enveloppe et du gaz ;

le poids de l'air contenu dans l'appareil a pour expression, quand on ferme le robinet g :

$$V \frac{1 + kT}{1 + \alpha T} \times \delta \times \frac{H}{760}.$$

Ce poids, quand l'appareil est à 0°, a pour expression :

$$\left(V + v \frac{1}{1 + \alpha t}\right) \delta \times \frac{H' - h}{760}.$$

On a donc, en égalant ces deux poids, supprimant les facteurs communs et divisant par V :

$$\frac{1 + kT}{1 + \alpha T} H = \left(1 + \frac{v}{V} \times \frac{1}{1 + \alpha t}\right) (H' - h),$$

équation qui donne la valeur de T.

L'avantage principal de cette manière d'opérer consiste en ce que le réservoir éprouve toujours la même pression sur ses parois intérieure et extérieure pendant qu'il est échauffé, et qu'il n'y a pas de déformation permanente à craindre tant qu'on n'atteint pas la température à laquelle le verre commence à se ramollir.

473. Pyromètre à air (475). La disposition précédente est aussi très convenable pour un pyromètre à air. Le ballon de verre A est remplacé dans ce cas par une boule en platine d'une aussi grande capacité que possible, sur laquelle on a soudé à l'or un tube capillaire en platine, qu'on peut fabriquer en étirant à la filière un tube d'un diamètre plus grand rempli de plomb ou d'étain. Quand le tube est étiré, on fait fondre le plomb ou l'étain, dont on facilite l'écoulement avec un petit fil de fer. On achève le nettoyage du tube avec un acide.

La sensibilité de l'appareil sera moins grande dans les hautes que dans les basses températures; mais elle sera toujours suffisante, parce que la mesure des forces élastiques du gaz comporte une grande précision.

Suivant que l'appareil aura été porté à la température de :

60, 1000, 1500, 2000°,

à 0°, la force élastique en millimètres sera respectivement :

237, 163, 117, 91.

La plus grande cause d'incertitude provient de ce qu'on ne connaît pas la loi de dilatation de l'enveloppe, c'est-à-dire les valeurs de k à ces hautes températures; mais cette cause ne peut jamais amener d'erreurs bien considérables.

Il convient, toutes les fois que cela est possible, de disposer le thermomètre à air de manière qu'on puisse déterminer directement, par l'expérience, les forces élastiques à 0° et à 100°, le réservoir étant plongé dans la glace fondante ou maintenu dans la vapeur d'eau bouillante. Mais il arrivera souvent que la détermination directe des deux points fixes de l'échelle thermométrique sera impossible, lorsque, par exemple, le thermomètre sera disposé dans des vases où il est difficile de pénétrer; on sera alors obligé de prendre le point de départ du thermomètre à air à la température du milieu ambiant, prise sur un thermomètre à mercure, et de déduire ensuite par le calcul des éléments qui conviennent à l'appareil pour la température de la glace fondante.

Si le thermomètre renferme de l'air ayant une force élastique de 760 millimètres à 0°, aux températures plus élevées :

100°, 200°, 300°, 350°, 400°, 500°, 600°, 700°, 800°,

il représentera en millimètres les forces élastiques respectives :

1036, 1311, 1584, 1720, 1856, 2125, 2394, 2661, 2925.

Si la température ne dépasse pas 350°, la force élastique de l'air intérieur ne deviendra pas plus grande que 1720 millimètres; la pression effective, sur les parois, ne dépassera pas $1720 - 760 = 960$ millimètres; elle sera donc trop faible pour qu'il y ait à craindre une déformation permanente de l'enveloppe. Mais dans les températures plus élevées on a à craindre une déformation permanente pour deux raisons :

1° La pression intérieure devient considérable;

2° Le verre peut éprouver un ramollissement sensible.

Il convient donc d'introduire dans le thermomètre de l'air avec une force élastique plus faible, lorsque le thermomètre est destiné à la mesure de températures très élevées. Si l'air présentait à 0° une force élastique de 300 millimètres, il acquerrait à 500° une force élastique de 850 millimètres, qui ne surpasse la pression extérieure que de 90 millimètres.

474. Thermomètre à mercure. Ce thermomètre n'étant pas un instrument comparable au delà des températures qui ont servi à déterminer les points fixes de son échelle, on ne devra pas s'en servir, dans des expériences précises, pour mesurer des températures élevées; il faudra avoir recours au thermomètre à air (471). Mais l'emploi de ce dernier appareil est beaucoup plus difficile; il exige des manipulations très délicates, et il peut se présenter des circonstances dans lesquelles le thermomètre à air devient complètement inapplicable : telle est, par exemple, celle où l'on a à déterminer des températures dans des espaces très rétrécis; il faut alors se servir nécessairement d'un thermomètre à mercure; mais il convient de faire préalablement une comparaison directe de cet instrument avec un thermomètre à air.

En opérant comme pour les thermomètres de gaz différents (p. 607), Regnault a comparé au thermomètre à air des thermomètres à mercure faits avec différents verres ; le tableau suivant contient les résultats qu'il a obtenus.

TEMPÉRATURES du thermomètre à air.	TEMPÉRATURES DU THERMOMÈTRE A MERCURE.			
	Cristal de Choisy-le-Roi.	Verre ordinaire à tubes, ballons et cornues.	Verre vert peu fusible.	Verre de Suède très infusible.
100°	100°,00	100°,00	100°,00	100°,00
110	110,05	109,98	110,03	110,02
120	120,12	119,95	120,08	120,04
130	130,20	129,91	130,14	130,07
140	140,29	139,85	140,21	140,11
150	150,40	149,80	150,30	150,15
160	160,52	159,74	160,40	160,20
170	170,65	169,68	170,50	170,26
180	180,89	179,63	180,60	180,33
190	191,01	189,65	190,70	190,41
200	201,25	199,70	200,80	200,50
210	211,53	209,75	211,00	210,61
220	221,82	219,80	221,20	220,75
230	232,16	229,85	231,42	230,90
240	242,55	239,90	241,60	241,16
250	253,00	250,05	251,85	251,44
260	263,44	260,20	262,15	
270	273,90	270,38	272,50	
280	284,48	280,52	282,85	
290	295,10	290,80	293,30	
300	305,72	301,08		
310	316,45	311,45		
320	327,25	321,80		
330	338,22	332,40		
340	349,30	343,00		
350	360,50	354,00		

Compositions chimiques moyennes des enveloppes de ces thermomètres à mercure, densité de ces enveloppes, dilatation k de ces enveloppes quand on porte leur température de 0° à 100°, et dilatation apparente k' du mercure qu'elles contiennent pour la même élévation de température.

	Cristal de Choisy-le-Roi.	Verre ordinaire.	Verre vert.	Verre de Suède.
Silice.	54,16	70,48	68,58	71,37
Alumine. . . .	0,52	0,46	1,23	0,33
Oxyde de fer. .	»	0,28	1,84	Traces.
Oxyde de manganèse. . . .	»	0,19	0,46	*id.*
Chaux.	0,38	8,75	14,07	9,86
Potasse.	9,23	2,14	2,00	17,23
Soude.	0,90	17,20	12,00	1,79
Magnésie. . . .	»	»	»	Traces.
Oxyde de plomb.	34,62	»	»	»
	99,79	99,50	100,18	100,98
Densité.	3,304	2,455	2,481	2,410
$k=$	0,002 144	0,002 686	0,002 324	0,002 492
$k'=$	0,015 974	0,015 426	0,015 789	0,015 621

7 Regnault a posé la formule d'interpolation à trois termes suivante, pour établir la *relation qui existe entre la dilatation cubique du verre et sa température.* Cette formule ne représente pas ses observations d'une manière satisfaisante; mais elle suffit cependant lorsqu'on se propose seulement de calculer les tables de dilatation du verre, qui sont nécessaires pour corriger les thermomètres à air des dilatations de leurs enveloppes.

Cette formule est :

$$k_T = a + bT + cT^2.$$

k_T dilatation cubique du verre de 0° à T°;
T température indiquée par le thermomètre à air;

$a=0$ pour le cristal de Choisy-le-Roi, et $a=0$ pour le verre ordinaire;
log $b=\bar{4},1957769$ *id.* et log $b=\bar{5},4171928$ *id.* (*Int.* 401);
log $c=\bar{8},2580666$ *id.* et log $c=\bar{8},1691500$ *id.*

C'est à l'aide de cette formule que Regnault a calculé le tableau suivant, pour le cristal de Choisy-le-Roi et le verre ordinaire en tube, seules qualités de verre qu'il y ait employées à la construction des thermomètres à air.

Comme les dilatations absolues du mercure croissent à peu près proportionnellement aux températures, les résultats obtenus par Regnault se trouvent représentés d'une manière satisfaisante par la formule d'interpolation à deux termes :

$$\delta_T = bT + cT^2,$$

dont les constantes ont été calculées avec les données suivantes :

$$T = 150°, \quad \delta_T = 0,027\,419, \quad \text{et} \quad T = 300°, \quad \delta_T = 0,055\,973.$$

δ_T dilatation absolue du mercure quand on porte sa température de 0° à T°, en admettant la valeur de k_T du tableau suivant;
T température indiquée par le thermomètre à air;
log $b=\bar{4},2528690$, log $c=\bar{8},4019441$.

C'est à l'aide de cette dernière formule qu'on a calculé les dilatations δ_T du tableau suivant.

La cinquième colonne du tableau donne les coefficients réels de dilatation absolue du mercure, lorsqu'il passe de la température T à celle immédiatement supérieure T + dT. Ces coefficients, qui représentent les inclinaisons de la tangente en chaque point de la courbe ayant les valeurs de T pour abscisses et celles de δ_T pour ordonnées (9 et 10), sont données par la relation :

$$\frac{d\delta_T}{dT} = b + 2cT.$$

La sixième colonne du tableau contient les températures θ que marquerait un thermomètre qui serait fondé sur la dilatation absolue du mercure. Ces températures sont données par la formule :

$$\theta = 100 \times \frac{\delta_T}{\delta_{100}} = 100 \frac{\delta_T}{0,018153}.$$

Température du therm. à air. T	Dilatation cubique k_T de 0° à T°. Cristal de Choisy-le-Roi.	Verre ordinaire.	Dilatation absolue du mercure de 0° à T°. δ_T	Coefficient réel de dilatation à T°. $\frac{d\delta_T}{dT}$.	Température déduite de la dilatation absolue du mercure. θ
0°	0,000000	0,0000000	0,000000	0,00017905	0°
10	0,000227	0,0002628	0,001792	17950	9,872
20	454	5285	3590	18001	19,776
30	681	7973	5393	18051	29,709
40	909	0,0010689	7201	18102	39,668
50	0,001137	13435	9013	18152	49,650
60	1368	16211	0,010831	18203	59,665
70	1594	19016	12655	18253	69,713
80	1825	21851	14482	18304	79,777
90	2054	24716	16315	18354	89,875
100	0,002284	0,0027609	0,018153	0,00018405	100, »
110	2516	30532	19996	18455	110,153
120	2747	33486	21844	18505	120,333
130	2980	36468	23697	18556	130,540
140	3212	39479	25555	18606	140,776
150	3445	42525	27419	18657	151,044
160	3678	45600	29287	18707	161,334
170	3912	48705	31160	18758	171,652
180	4146	51822	33039	18808	182,003
190	4380	54967	34922	18859	192,376
200	0,004616	0,0058171	0,036811	0,00018909	202,782
210	4851	61383	38704	18959	213,210
220	5088	64636	40603	19010	223,671
230	5325	67919	42506	19061	234,154
240	5561	71232	44415	19111	244,670
250	5799	74559	46329	19161	255,214
260	6037	77922	48247	19212	265,780
270	6275	81324	50171	19262	276,379
280	6514	84756	52100	19313	287,005
290	6753	88218	54034	19363	297,659
300	0,006994	0,0091686	0,055973	0,00019413	308,340
310	7234	95201	57917	19464	319,048
320	7474	98752	59866	19515	329,786
330	7716	0,0102333	61820	19565	340,550
340	7958	105944	63778	19616	351,336
350	8199	109585	65743	19666	362,160

Pour avoir la dilatation moyenne pour 1°, de 0° à T°, il suffit de diviser le nombre d'une des colonnes deux, trois, quatre, correspondant à T°, par T; ainsi, par exemple, le coefficient moyen de dilatation du cristal de Choisy-le-Roi, entre 0° et T = 200°, est

$$\frac{0,004\,616}{200} = 0,000\,023\,08.$$

475. Pyromètre de Wedgwood (473). Cet instrument, fondé sur le retrait qu'éprouve un cône d'argile lorsqu'on le soumet à une température élevée, sert à évaluer les hautes températures. Le 0° de cet instrument correspond à la température de 580°,56 centigrades; c'est la température du rouge naissant, à laquelle on fait recuire les cônes d'argile. L'échelle porte ensuite 240 divisions qu'on suppose équivaloir chacune

à 72°,22 centigrades. L'échelle est placée sur une règle accompagnée d'une autre faisant avec la première un certain angle; de sorte qu'en faisant glisser entre ces deux règles le cône d'argile, qui a été placé pendant un temps convenable dans le milieu dont on veut mesurer la température pour prendre lui-même cette température, le point de l'échelle où il s'arrête indique la température cherchée. Le retrait de l'argile pouvant ne pas être proportionnel à la température, on ne doit regarder les indications du pyromètre que comme des valeurs approchées. Cet instrument est surtout utile pour reconnaître les variations de température.

476. *Tableau des températures de fusion et d'ébullition de quelques corps, d'après l'*Annuaire du bureau des Longitudes (1).

NOMS DES SUBSTANCES.	TEMPÉRATURE de fusion	TEMPÉRATURE d'ébullition (2).
	degrés.	degrés.
Acide acétique concentré	17	120
— azotique anhydre	29,5	50
— azotique monohydraté	—50	86
— azotique quadrihydraté		123
— benzoïque	120	240*
— butyrique	<— 9	157
— carbonique		— 78
— chlorhydrique du p. sp. 1,110		110
— chlorique		137,5
— cyanhydrique	—13,8	26,2
— fluorhydrique	<—40	30
— formique		105,3
— hypoazotique	— 9	25
— hypochloreux		20
— iodhydrique		128
— margarique	60	
— nitrobenzoïque	47	300
— perchlorique concentré		200
— périodique	130	
— stéarique	70	
— succinique	185	245
— sulfhydrique	—85*	
— sulfocyanhydrique	—12	102,5
— sulfureux	—78,9	— 10
— sulfurique anhydre	25	32*
— sulfurique monohydraté	—34	326
— sulfurique bihydraté	7*	
Acier	1300 à 1400	
Alcool absolu	<—90	78,3
— 1 p. et 1 p. d'eau	—21	

(1) Un astérisque * indique un nombre qui ne doit être considéré que comme une valeur approchée; le signe < indique une température inférieure et le signe > une température supérieure à celle qui est inscrite à côté du signe.
(2) Ebullition sous une pression voisine de la pression normale.

NOMS DES SUBSTANCES.	TEMPÉRATURE de fusion.	TEMPÉRATURE d'ébullition.
	degrés.	degrés.
Alcool amylique (huile de pommes de terre).	—23	131,8
Alcool méthylique (esprit de bois).		66,3
Aldéhyde.		20,8
Alliage 3 éq. de plomb et 1 d'étain.	289	
— 1 — 1 —	241	
— 1 — 2 —	196	
— 1 — 3 —	186	
— 1 — 4 —	189	
— 1 — 5 —	194	
— 2 — 9 — et 1 de zinc.	168	
— 5 part. plomb, 3 étain, 8 bismuth (métal de Darcet).	94	
Aluminium.	600*	
Ammoniaque anhydre.	—80*	—35
Antimoine.	440	
Argent.	1000*	
Arsenic.	210	
Azote (protoxyde de).		—88
Azotate d'argent.	198	
Baume de copahu.		212
Benzine.	7	80,8
Beurre.	30	
Bismuth.	265	
Brome.	— 7,5	63
Bromure (proto) de phosphore.		175,3
— de silicium.		153,4
Bronze.	900*	
Cadmium.	500*	
Camphre de Bornéo.	195	215
— du Japon.	175	205
Caoutchouc.	>120	
Carbonate de potasse (dissolution saturée).		135
— de soude —		104,6
Chlorhydrate d'ammoniaque —		114,2
Chlorate de potasse.	334	
Chlore liquide.		—40
Chlorure d'arsenic.	<—29	132
— de baryum (dissolution saturée).		104,4
— de calcium —		179,5
— de cyanogène (gazeux).	—16	—12
— — (solide).	140	190
— d'élaïle (liqueur des Hollandais.		84,9
— (bi) d'étain (liqueur de Libavius).		115,4
— d'iode.	17,5*	22,5*
— de manganèse.		—15
— (proto) de phosphore.	<—36	78,3
— (per) de phosphore.	148	148
— de potassium (dissolut. du) p. sp. 1,048 à 18°,8.		102,0
1,096.		104,0
1,144.		106,0
1,192.		108,1
— de silicium.		59
— de sodium (dissolution saturée).		108,4
— de soufre (ClS^2).		138
— (ClS).		64
— (bi) de titane.		136
— de zinc.	250*	
Cire jaune.	76,2	
— blanche.	68,7	
Colophane.	135	

NOMS DES SUBSTANCES.	TEMPÉRATURE de fusion.	TEMPÉRATURE d'ébullition.
	degrés.	degrés.
Créosote		203
Cuivre	1050*	
— jaune	1015*	
Cyanogène	—40	—18
Eau oxygénée	<—30	
— de mer	— 2,5	103,7
Essence d'amandes amères		176
— d'anis	18	220*
— de citron		167
— de moutarde		145
— de térébenthine	—10	156,8
Étain	235	
Ether sulfurique	<—32	35,5
— acétique	<—36	74,1
— benzoïque		209
— bromhydrique	<—32	40,7
— butyrique		115
— chlorhydrique	<—32	11
— formique	<—32	52,9
— iodhydrique	<—32	70
— oxalique		183
Fer doux français	1500*	
— martelé anglais	1600*	
Fonte de fer	1050 à 1200	
Graisse de mouton	51	
Huile de lin	—20	387,5
— d'olive	2,5	
— de palme	29	
— de ricin	—18	265*
Iode	107	176
Lithium	180	
Mercure	—39,5	350
Naphtaline	78	210
Nitrobenzine	3	213
Or	1250*	
— au titre de la Monnaie	1180*	
Palladium	1700*	
Paraffine	43,7	370*
Pétrole		106
Phosphore	44,2	290
Platine	>1700	
Plomb	335	
Potassium	55	700*
Potasse caustique (dissolution saturée)		175
Sélénium	217	700*
Sodium	90	700*
Soufre	114,5	400
Spermaceti	49	
Stéarine	61	
Succin	288	
Sucre de canne	160	
— de raisin	100	
Suif	33	
Sulfure de carbone		48
Tellure	525*	
Urée	120	
Zinc	450*	1300*

477. Une lame de fer parfaitement décapée, chauffée lentement au contact de l'air, prend les teintes suivantes :

1° Blanc de fer froid à environ 12°	4° Rouge à . . . . 265°	7° Bleu à . . . . . 293°
2° Jaune à . . . . 225°	5° Violet à. . . . . 277°	8° Vert à . . . . . 332°
3° Orangé à . . . . 243°	6° Indigo à . . . . 288°	9° Gris d'oxyde à 400°

Tableau des températures correspondant à différentes nuances lumineuses, d'après les expériences de Pouillet, à l'aide d'un pyromètre à air (473).

NUANCES.	TEMPÉRATURE en degrés centigr.	NUANCES.	TEMPÉRATURE en degrés centigr.
Rouge naissant.	525	Orange foncé	1100
Rouge sombre.	700	Orange clair	1200
Cerise naissant.	800	Blanc	1300
Cerise.	900	Blanc suant.	1400
Cerise clair.	1000	Blanc éblouissant. . . .	1500

DILATATION

478. Dilatation des solides par la chaleur. Tous les corps jouissent de la propriété de se dilater par la chaleur, mais à des degrés différents.

Voici plusieurs tableaux donnant les dilatations *linéaires* des principaux corps :

Pour la dilatation *superficielle*, voir n° 479.

Pour la dilatation *cubique*, voir n° 480.

Pour la dilatation des *liquides*, voir n° 481.

Pour la dilatation des *gaz*, voir n° 482.

Nota. Soit une barre prismatique de 1 mètre de longueur qui s'allonge de α pour une élévation de température de 1 degré; on dit que l'accroissement α est le coefficient de dilatation linéaire. Cela étant, considérons une plaque carrée de la même substance de 1 mètre de côté; pour une augmentation de 1 degré de température, l'aire superficielle sera : $(1+\alpha)^2 = 1 + 2\alpha + \alpha^2$; par conséquent l'accroissement superficiel est $2\alpha + \alpha^2$ ou très approximativement 2α en négligeant α^2, qui est très petit. Donc la dilatation superficielle est double de la dilatation linéaire.

Considérons un cube de la même substance dont le côté $=1$ mètre. Un accroissement de température de 1 degré produira sur les arêtes du cube un accroissement α et le cube deviendra :

$$(1+\alpha)^3 = 1 + 3\alpha^2 + 3\alpha + \alpha^3).$$

L'accroissement de volume sera :

$$(1+\alpha)^3 - 1 = 3\alpha^2 + 3\alpha + \alpha^3,$$

ou approximativement 3α, en négligeant $3\alpha^2$ et α^3 qui sont très petits. Donc la dilatation cubique 3α est mesurée par le triple de la dilatation linéaire α.

Tableau de la dilatation linéaire, c'est-à-dire de l'accroissement de longueur des corps solides, pour 1° et dans l'intervalle de 0° à 100°, en prenant pour unité la longueur primitive à 0°.

Observation. — En tête de chaque colonne nous plaçons les premiers chiffres à gauche de la dilatation, qui est ainsi 0,000 010 750 pour l'acier, d'après Ellicot.

SOLIDES.	DILATAT.	AUTEURS.
	0,0000	
Acier	10750	Ellicot.
	10791	Laplace et Lavoisier.
	11040	Berthoud.
	11600	De Luc.
	11301	Struve.
	11899	Troughton.
Acier. poule	11500	Smeaton.
Acier. de la Styrie	11520	Horner.
Acier. de Schafhouse	11120	*Id.*
Acier. huntsman	10740	*Id.*
Acier trempé	12250	Smeaton.
	13750	Berthoud.
Acier recuit à 37°,5	13690	Laplace et Lavoisier.
Acier recuit à 81°,2	12396	*Id.*
Alliage. Zinc 8 p., étain 1 p. (forgé)	26917	Smeaton.
Alliage. Plomb 2, étain 1 (soudure blanche)	25053	*Id.*
Alliage. De miroir de télescope	19333	*Id.*
Alliage. Des caractères d'imprimerie	20352	Daniell.
Aluminium	22239	Winnerl.
Antimoine	10833	Smeaton.
Argent	19512	Daniell.
	19780	Ellicot.
	20826	Troughton.
Argent de coupelle	19097	Laplace et Lavoisier.
Argent au titre de Paris	19087	*Id.*
Bismuth	13917	Smeaton.
Bois de sapin	03520	Struve.
	04959	Kater.
Briques ordinaires	05502	Adie.
Briques dures	04928	*Id.*
Bronze	18492	Daniell.
Bronze. Cuivre jaune 16 p., étain 1 p.	19083	Smeaton.
Bronze. Cuivre rouge 8 p., étain 1 p.	18167	*Id.*
Cadmium, d'après sa dilatation cubique	31300	H. Kopp.
Charbon de bois de sapin	10000	Heinrich.
Charbon de bois de chêne	12000	*Id.*
Chaux carbonatée suivant l'axe principal	28600	Mitscherlich.
Chaux carbonatée perpendiculairement à cet axe	—05600	*Id.*
Ciment romain	14349	Adie.
Cuivre jaune	18230	Ellicot.
Cuivre jaune fondu	18750	Smeaton.
Cuivre jaune anglais en barre	18930	Roy.
Cuivre jaune de Hambourg	18550	*Id.*
Cuivre jaune du Tyrol, en planche	19030	Horner.
Cuivre jaune en fil	18850	Herbert.
Cuivre jaune laiton	18782	Laplace et Lavoisier.
Cuivre jaune laiton en fil	19333	Smeaton.
Cuivre jaune cuivre 2 p., zinc 1, soudure	20583	*Id.*
Cuivre jaune cuivre 3 p., zinc 1 p.	21444	Daniell.
Cuivre rouge	17840	Borda.
	17173	Laplace et Lavoisier.
	17100	Ellicot.
	17182	Dulong et Petit.

SOLIDES.	DILATAT.	AUTEURS.
	0,0000	
Cuivre rouge { entre 0 et 300 degrés	18832	Dulong et Petit.
Cuivre rouge { forgé	17000	Smeaton.
Étain { fin	22833	*Id.*
Étain { de Falmouth	21730	Laplace et Lavoisier.
Étain { des Indes	19376	*Id.*
Fer	11560	Borda.
	11680	Horner.
	11808	Daniell.
	11821	Dulong et Petit.
Fer { entre 0 et 300 degrés	14684	*Id.*
Fer { doux forgé	12205	Laplace et Lavoisier.
Fer { rond passé à la filière	12350	*Id.*
Fer { fil de	14401	Troughton.
Fonte de fer	09850	Navier.
	10716	Daniell.
	11100	Roy.
	11245	Adie.
Glace, entre —27°,5 et —1°,25	51270	Pohrt.
	51813	Moritz.
	52356	Schumacher.
Glace entre —20° et —7°	52833	Plucker et Geissler.
Granit	08685	Bartlett.
Granit { rouge de Peterhead	08968	Adie.
Granit { gris d'Aberdeen	07894	*Id.*
Gypse, suivant la longueur du prisme	14010	Angstrom.
Marbre blanc	10720	Dunn et Sang.
Marbre blanc de Carrare	08487	Destigny.
Marbre noir	04260	Dunn et Sang.
Marbre noir { de Galway	04452	*Id.*
Marbre noir { de Saint-Béat	04181	Destigny.
Marbre noir { de Solst	05685	*Id.*
Or	14010	Ellicot.
Or { de départ	14661	Laplace et Lavoisier.
Or { recuit	15136	*Id.*
Or { non recuit	15515	*Id.*
Palladium	10000	Wollaston.
Phosphore	14245	Ermann.
Pierre à bâtir { de Vernon-sur-Seine	04303	Destigny.
Pierre à bâtir { de Saint-Leu	06489	*Id.*
Pierre à bâtir { de Caithness	08947	Adie.
Pierre à bâtir { de Arbroath	08985	*Id.*
Pierre calcaire { blanche	02510	Vicat.
Pierre calcaire { verte de Ratho	08089	Adie.
Pierre { schisteuse, de Penrhyn	10376	*Id.*
Pierre { grès de Liver-Roch	11743	*Id.*
Platine	08565	Borda.
	08842	Dulong et Petit.
Platine entre 0 et 300 degrés	09183	*Id.*
Plomb	28484	Laplace et Lavoisier.
	28667	Smeaton.
	28820	Ellicot.
	27856	Daniell.
Spath fluor	20700	H. Kopp.
Terre cuite	04573	Adie.
Verre blanc { Tubes de baromètre	08333	Smeaton.
Verre blanc { Tubes	07755	Roy.
Verre blanc { Verge pleine	08083	*Id.*
Verre blanc { Tubes (moyenne)	09170	Horner.
Verre blanc { Verges pleines (moyenne)	09220	*Id.*
Verre blanc { Tubes (moyenne)	08969	Laplace et Lavoisier.
Verre blanc { Règle de	08613	Dulong et Petit.

SOLIDES.	DILATAT.	AUTEURS.
	0,0000	
Verre blanc (*Suite*). Entre 0 et 200 degrés	09225	Dulong et Petit.
Verre blanc (*Suite*). Entre 0 et 300 degrés	10108	*Id.*
Verre blanc (*Suite*). Glaces de Saint-Gobain	08909	Laplace et Lavoisier.
Verre blanc (*Suite*). Flint anglais	08167	*Id.*
Verre blanc (*Suite*). Flint français	08720	*Id.*
Zinc fondu	29417	Smeaton.
	29680	Horner.
Zinc. Allongé au marteau de 1/12	31083	Smeaton.
Zinc. Règle de	34066	Struve.

Dilatation des métaux et de divers autres corps solides, d'après M. Fizeau.

(Voir ci-après la note explicative.)

SUBSTANCES.	Coefficient de dilatation linéaire $\alpha_{\theta=40°}$	Variation du coefficient pour 1° $\frac{\Delta\alpha}{\Delta\theta}$	Allongement de l'unité de longueur calculée de 0° à 100° $100\left(\alpha_{\theta=40°}+10\frac{\Delta\alpha}{\Delta\theta}\right)$
	0,000		0,00
Carbone (diamant)	00118	1,44*	0132
Charbon métallique (des cornues à gaz)	00540	1,10*	0551
Graphite (de Batongol)	00786	1,01*	0796
Anthracite (de Pensylvanie)	02078	—8,15	1996
Houille (de Charleroy)	02782	2,93	2811
Paraffine (de Rangoon), fusible vers 56 degrés	27854	99,26	»
Silicium (fondu)	00763	1,69	0780
Soufre (de Sicile). Dilatation moyenne suivant l'angle 54° 44′ avec les trois axes du cristal	06413	33,48	6748
Sélénium (fondu)	03680	11,15	3792
Tellure (fondu)	01675	5,75	1732
Arsenic (sublimé, en cristaux confus)	00559	4,32	0602
Osmium (demi-fondu)	00657	2,18	0679
Ruthénium (demi-fondu, poreux)	00963	2,81	0991
Palladium (forgé, recuit)	01176	1,32*	1189
Rhodium (demi-fondu)	00850	0,81*	0858
Iridium (fondu)	00683	0,94*	0708
Platine (fondu)	00905	1,06*	0907
Platine-iridium (fondu, Ir. = 0,08), métal du trépied à vis employé pour la mesure des dilatations	00882	0,76*	0890
Or (fondu)	01443	0,83*	1451
Argent (fondu)	01921	1,47*	1936
Cuivre rouge natif (du lac Supérieur)	01690	1,83*	1708
Cuivre rouge des arts	01678	2,05*	1698
Cuivre jaune (cuivre = 71,5; zinc = 27,7; étain = 0,3; plomb = 0,5)	01859	1,96*	1879
Bronze (cuivre = 86,3; étain = 9,7; zinc = 4,0)	01782	2,04*	1802
Nickel réduit par l'hydrogène et comprimé	01279	0,71	1286
Cobalt réduit par l'hydrogène et comprimé	01236	0,80	1244
Fer doux, des arts	01210	1,85*	1228
Fer réduit par l'hydrogène et comprimé	01188	2,05	1208
Fer météorique (de Caille)	01095	1,75*	1113
Acier fondu (français) trempé	01322	3,99	1362
Acier fondu (français) recuit	01101	1,24*	1113

SUBSTANCES.	Coefficient de dilatation linéaire $\alpha_{\theta=40°}$	Variation du coefficient pour 1° $\frac{\Delta\alpha}{\Delta\theta}$	Allongement de l'unité de longueur calculée de 0° à 100° $100\left(\alpha_{\theta=40°}+10\frac{\Delta\alpha}{\Delta\theta}\right)$
	0,000		0,00
Acier fondu (anglais), recuit	01093	1,52*	1110
Fonte de fer (grise)	01061	1,37	1075
Bismuth cristallisé (rhomboèdre de 87°40') — α	01621	2,09	1642
— α′	01208	3,11	1239
— dilatation moyenne calculée	01346	2,77	1374
Antimoine cristallisé (rhomboèdre de 117°8′) — α	01692	—0,94	1683
— α′	00882	1,34	0895
— dilatation moyenne calculée	01152	0,58	1158
Étain de Malacca (poudre comprimée)	02234	3,51	2269
Indium (fondu)	04170	42,38	4594
Plomb (fondu)	02924	2,39*	2948
Thallium (fondu)	03021	11,41	3135
Zinc distillé (poudre comprimée)	02918	—1,27	2905
Cadmium distillé (poudre comprimée)	03069	3,26	3102
Aluminium (fondu)	02313	2,29*	2336
Magnésium (fondu)	02694	6,84*	2762
Glace (de Saint-Gobain)	00777	1,58*	0793
Obsidienne (transparente)	00484	1,14*	0495
Iodure d'argent (fondu)	—00139	—1,40*	—0153
Iodure d'argent (poudre comprimée)	—00137	—1,60*	—0153
Iodure de mercure (fondu)	02388	19,96	2588
Iodure de plomb (fondu)	03360	5,84	3418
Iodure de cadmium (fondu)	02916	17,47	3091
Bromure d'argent (fondu)	03469	3,83*	3507

Dilatation de divers corps cristallisés, d'après M. Fizeau.

(Voir ci-après la note explicative.)

SUBSTANCES.		COEFFICIENT de dilatation linéaire $\alpha_{\theta=40°}$	VARIATION du coefficient $\frac{\Delta\alpha}{\Delta\theta}$
Étain oxydé (Cassitérite)	α	0,00000392	1,19
	α′	0,00000321	0,76
Acide titanique (Rutile)	α	0,00000919	2,25
	α′	0,00000714	1,10
Acide titanique (Anatase)	α	0,00000819	3,11
	α′	0,00000468	2,95
Diamant		0,00000118	1,44*
Quartz (Cristal de roche)	α	0,00000781	2,05*
	α′	0,00001419	2,38*
Corindon (Alumine)	α	0,00000619	2,05
	α′	0,00000543	2,25
Acide antimonieux (Senarmontite)		0,00001963	0,57
Acide arsénieux (octaédrique)		0,00004126	6,79
Fer oligiste	α	0,00000829	1,19
	α′	0,00000836	2,62
Fer oxydulé (Magnétite)		0,00000846	2,89

SUBSTANCES.		COEFFICIENT de dilatation linéaire $\alpha_{\theta=40°}$	VARIATION du coefficient $\frac{\Delta\alpha}{\Delta\theta}$
Franklinite		0,00000806	0,94
Zinc oxydé (Spartalite)	α	0,00000316	1,86
	α'	0,00000539	1,23
Magnésie (Périclase artificielle)		0,00001043	2,67
Cuivre oxydulé (Ziguéline)		0,00000093	2,10*
Plomb sulfuré (Galène)		0,00002014	0,54*
Zinc sulfuré (Blende)		0,00000670	1,28*
Pyrite cubique (Fer sulfuré jaune)		0,00000913	1,78*
Cobalt gris (Cobaltine)		0,00000919	1,70*
Cobalt arsenical (Smaltine)		0,00000919	1,64
Cuivre gris (d'Alais)		0,00000922	2,07
Cuivre gris (de Schwartz)		0,00000871	2,25
Cuivre gris (du Dauphiné)		0,00000733	2,34
Manganèse sulfureux (Alabandine de Nagyag)		0,00001519	2,17
Bisulfure de manganèse (Hauérite)		0,00001111	8,89
Sesquisulfure de cobalt (Linnæite)		0,00001037	1,59
Sulfo-antimoniure de nickel (Ullmannite)		0,00001112	—0,15
Cuivre panaché (Phillipsite)		0,00001714	1,70
Pyrite magnétique	α	0,00000235	8,64
	α'	0,00003120	—1,65
Sulfo-antimoniure d'argent (Argent rouge)	α	0,00000091	10,52
	α'	0,00002012	—2,31
Antimoine sulfuré, dilatation moyenne		0,00001528	2,16
Cinabre transparent	α	0,00002147	1,51*
	α'	0,00001791	0,63*
Magnésie carbonatée (Giobertite de Bruck)	α	0,00002130	3,39
	α'	0,00000599	2,43
Fer carbonaté magnésien (Sidéroplésite)	α	0,00001918	2,55
	α'	0,00000605	1,73
Dolomie de Traverselle	α	0,00002060	3,68
	α'	0,00000415	1,93
Chaux carbonatée (Spath d'Islande)	α	0,00002621	1,60
	α'	—0,00000540	0,87
Aragonite	α	0,00003460	3,37
	α'	0,00001719	3,68
	α''	0,00001016	0,64
Chaux fluatée (Spath fluor)		0,00001911	2,88*
Baryte sulfatée, dilatation moyenne		0,00001806	0,95
Strontiane sulfatée, dilatation moyenne		0,00001754	1,15
Magnésie boratée (Boracite)		0,00000391	1,69
Sel gemme		0,00004039	4,49
Chlorure de potassium		0,00003803	5,15
Sel ammoniac		0,00006255	29,75
Bromure de potassium		0,00004201	9,78
Iodure de potassium		0,00004265	16,76
Chlorure d'argent cristallisé		0,00003294	12,23
Iodure d'argent cristallisé	α	—0,00000397	—4,27
	α'	0,00000065	1,38
Staurotide, dilatation moyenne		0,00000708	3,15
Topaze blanche (de l'Australie)	α	0,00000592	1,83*
	α'	0,00000484	1,53*
	α''	0,00000414	1,68*
Tourmaline verte (du Brésil)	α	0,00000905	3,20*
	α'	0,00000379	1,83*
Idocrase (Vésuvienne de Wilui)	α	0,00000740	1,74*
	α'	0,00000839	1,67*
Grenat pyrope (de Bohême)		0,00000827	2,10
— oriental (de l'Inde)		0,00000837	1,80*

SUBSTANCES.		COEFFICIENT de dilatation linéaire $\alpha_{\theta=40°}$	VARIATION du coefficient $\frac{\Delta\alpha}{\Delta\theta}$
Grenat noble (du Groënland)		0,000 008 32	1,31
— spessartine (de Haddam)		0,000 008 24	2,14
— mélanite (de Frascati)		0,000 007 34	1,43*
— — (de Magnet-Cove)		0,000 007 36	1,74*
— aplôme (de Saxe)		0,000 007 43	0,70
— strié (d'Orsowa)		0,000 007 45	1,78
— essonite (de Ceylan)		0,000 006 93	1,87*
— grossulaire (de Wilui)		0,000 006 93	1,60*
— — (d'Oravitza)		0,000 006 84	1,60
Spinelle (Rubis balais de Ceylan)		0,000 005 93	1,95
— (Pléonaste de Warwick)		0,000 006 03	1,97
— (Gahnite de Fahlun)		0,000 005 95	1,83
— (Kreittonite de Silberberg)		0,000 005 96	1,94
Cymophane (Chrysobéryl)	α	0,000 006 02	2,20
	α'	0,000 005 16	1,22
	α''	0,000 006 01	1,01
Émeraude (Béryl)	α	—0,000 001 06	1,14*
	α'	0,000 001 37	1,33*
Phénakite	α	0,000 003 60	2,20
	α'	0,000 002 92	1,34
Zircon	α	0,000 004 43	1,41
	α'	0,000 002 33	1,91
Feldspath (Orthose du St-Gothard), $D_o=18°48'$	α	—0,000 002 03	1,28
	α'	0,000 019 05	1,06
	α''	—0,000 001 51	1,46
Épidote (du Brésil), $D_o=34°8'$	α	0,000 009 13	2,55
	α'	0,000 003 34	2.06
	α''	0,000 010 86	3,05
Pyroxène (Augite de Westerwald), $D_o=53°37'$	α	0,000 013 86	0,76
	α'	0,000 002 72	0,76
	α''	0,000 007 91	2,08
Amphibole (Hornblende), dilatation moyenne		0,000 008 66	2,02
Azurite (Chessylite de Chessy), $D_a=29°3'$	α	0,000 012 59	2,03
	α'	0,000 020 81	»
	α''	—0,000 000 98	»
Gypse (Fer de lance de Montmartre), $D_a=15°2'$	α	0,000 041 63	9,36
	α'	0,000 001 57	1,09
	α''	0,000 029 33	3,43

Note explicative :

$\alpha_{\theta=40°}$. Accroissement de l'unité de longueur pour 1° situé au point 40° de l'échelle centigrade du thermomètre, ou accroissement moyen pour 1° lorsque la moyenne θ entre les températures extrêmes est 40°.

$\frac{\Delta\alpha}{\Delta\theta}$. Variation du coefficient lorsque le degré moyen θ est plus élevé de 1°. Les nombres marqués d'un astérisque (*) doivent être les plus exacts.

α. *Premier axe de dilatation.* Suivant une direction quelconque, pour les cristaux du système cubique; suivant l'axe principal, pour les cristaux doués d'un axe principal de symétrie; suivant la bissectrice de l'angle aigu formé par les axes optiques, pour les cristaux transparents orthorhombiques; suivant la normale au plan de symétrie, pour les cristaux clinorhombiques.

α'. *Deuxième axe de dilatation.* Suivant une normale quelconque à l'axe principal, pour les cristaux doués d'un axe principal de symétrie; suivant la bissectrice de l'angle obtus formé par les axes optiques, pour les cristaux transparents ortho-

rhombiques; suivant une direction située dans le plan de symétrie et inclinée sur la base du prisme de l'angle D_a *dans l'angle aigu*, ou de l'angle D_o *dans l'angle obtus* d'inclinaison du prisme, pour les cristaux clinorhombiques.

α''. *Troisième axe de dilatation.* Suivant la normale au plan des axes optiques, pour les cristaux transparents orthorhombiques; suivant une direction située dans le plan de symétrie et normale au plan des premier et deuxième axes de dilatation, pour les cristaux clinorhombiques.

Exemple numérique. Dilatation suivant l'axe, d'un cristal de quartz d'une longueur $l = 25^{mm}$ lorsque la température varie de $t = 12°$ à $t' = 48°$ (p. 620).

L'échauffement $t' - t = 36°$; le degré moyen $\theta = \frac{t'+t}{2} = 30°$; il est inférieur de $10°$ au degré moyen $\theta = 40°$ adopté dans le tableau. Il faut alors multiplier par 10 la variation du coefficient (deuxième colonne) et *retrancher* le produit obtenu de la valeur du coefficient α donnée dans le tableau, pour avoir le coefficient α_1 correspondant au degré moyen $\theta = 30°$ (si le degré moyen était supérieur à $40°$, le produit en question devrait être ajouté); on a ainsi :

$$\alpha_1 = 0{,}000\,007\,81 - 2{,}05 \times 10 = 0{,}000\,007\,605,$$

2,05 est exprimé en unités décimales de l'ordre du dernier chiffre de α_1 et la dilatation linéaire cherchée sera :

$$l\alpha_1(t'-t) = 0^{mm},006\,84.$$

Quand les nombres de la table ont le signe —, ils entrent dans le calcul avec ce signe. Si la longueur l de la substance a été mesurée à une température un peu différente de la température inférieure t, la différence qui en résulterait dans le calcul est négligeable.

Remarque. Les valeurs du tableau peuvent être introduites dans la formule ordinaire :

$$l_t = l_0(1 + at + bt^2)$$

en observant que l'on a :

$$a = \alpha_{\theta=0} \quad \text{et} \quad b = \frac{1}{2}\frac{\Delta\alpha}{\Delta\theta}.$$

Dilatation suivant une direction quelconque, faisant les angles b, b', b'' avec les trois axes de dilatation :

$$\alpha_n = \alpha \cos^2 b + \alpha' \cos^2 b' + \alpha'' \cos^2 b'',$$

ou dans le cas de deux dilatations principales :

$$\alpha_n = \alpha \cos^2 b + \alpha' \sin^2 b.$$

Dilatation cubique. Elle s'obtient au moyen de la dilatation linéaire de la manière suivante :

1° Pour les substances à une seule dilatation, ou dont la dilatation moyenne est seule connue, on prend :

$$\alpha^{cub} = 3\alpha;$$

2° Pour les cristaux à deux dilatations principales :

$$\alpha^{cub} = \alpha + 2\alpha';$$

3° Pour les cristaux à trois dilatations principales :

$$\alpha^{cub} = \alpha + \alpha' + \alpha''.$$

Dans le cas de très grandes dilatations (acide arsénieux) et de grands intervalles de température (200°), ces formules cessent d'être applicables, les termes négligés comme étant du second ordre devenant alors sensibles.

Pour des températures inférieures à 100°, la dilatation est à peu près proportionnelle au nombre de degrés; mais au delà, d'après les expériences de Dulong et Petit, dont les résultats sont consignés au tableau précédent, la dilatation croît sensiblement avec le degré de température.

479. **La dilatation superficielle d'un solide** est à peu près égale au double de sa dilatation linéaire, c'est-à-dire que si, pour un certain

nombre de degrés, la longueur d'un solide augmente de 1/100 de sa longueur à 0°, sa surface augmentera, pour le même nombre de degrés, de 2/100 de sa surface à 0°.

480. La dilatation cubique des solides est à peu près égale au triple de la dilatation linéaire (voir le nota, p. 616).

Tableau de la dilatation cubique du verre, pour 1 degré dans l'intervalle de zéro à 100 degrés.

SUBSTANCES.		DILATAT.	AUTEURS.
		0,0000	
Verre blanc	base de soude	25839	Dulong et Petit.
		25800	Despretz.
	base de potasse	22850	Rudberg.
	base de soude et potasse	25470	Magnus.
	de Wurtzbourg (moyenne)	26744	Muncke.
Verre blanc	en tube	26480	Regnault.
	le même soufflé en boule, 1° de 46 millimètres de diamètre	25920	*Id.*
	2° de 33 millimètres de diamètre	25140	*Id.*
Verre vert	en tube	22990	*Id.*
	le même soufflé en boule de 36 millimètres de diamètre	21320	*Id.*
Verre de Suède	en tube	23630	*Id.*
	le même soufflé en boule de 34 millimètres de diamètre	24410	*Id.*
Verre infusible	français, en tube	21420	*Id.*
	le même soufflé en boule de 32 millimètres de diamètre	22420	*Id.*
Verre ordinaire	24310 à	27580	*Id.*
Cristal ordinaire	en tube	21010	*Id.*
	le même soufflé en boule de 39 millimètres de diamètre	23300	*Id.*
Cristal de Choisy-le-Roi	21440 à	24420	*Id.*
	19026 à	26025	Isidore Pierre.

Dilatation cubique du verre, suivant M. Regnault.

VERRES.	INTERVALLE.	DILATATION moyenne pour 1 degré.
Cristal de Choisy-le-Roi	de 0 à 50°	0,0000227
	0 100	0,0000228
	0 150	0,0000230
	0 200	0,0000231
	0 250	0,0000232
	0 300	0,0000233
	0 350	0,0000234
Verre ordinaire	de 0 à 50	0,00002687
	0 100	0,00002761
	0 150	0,00002835
	0 200	0,00002908
	0 250	0,00002982
	0 300	0,00003056
	0 350	0,00003131

481. Dilatation des liquides par la chaleur. L'augmentation ou la diminution absolue de volume de 0° à ± t° est représentée par l'expression :

$$at + bt^2 + ct^3.$$

Tableau des valeurs de a, b *et* c. Selon l'observation de la page 623, on a pour l'alcool : $a = 0,001\,048\,6301$, $b = 0,000\,001\,7510$ et $c = 0,000\,000\,001\,34$.

LIQUIDES.	DENSITÉ à 0 degré.	VALEURS extrêmes de t	COEFFICIENT a	b	c	AUTEURS.
		degrés.	0,00	0,000 00	0,000 000 0	
Alcool.	0,815 10	−33 à 78	1 048 6301	1 7510	01 34	Is. Pierre.
Chloroforme.	1,525 23	0 63	+1 107 1459	+4 6647	−17 43	*Id.*
Chlorure (bi) d'étain. . .	2,267 12	−20 112	1 132 8008	0 9117	07 58	*Id.*
— de zinc (dissol.)	1,363 20	15 100	0 543 5	1320		Frankenheim.
Eau.	1,000 00	0 25	−0 061 045	+7 7183	−37 34	H. Kopp.
	Id.	25 50	−0 065 415	+7 7587	−35 41	*Id.*
	Id.	50 75	0 059 160	3 1849	07 28	*Id.*
	Id.	75 100	0 086 450	3 1892	02 45	*Id.*
Esprit de bois.	0,820 74	−38 70	1 185 5697	1 5649	09 11	Is. Pierre.
Essence de térébenthine.	0,890 20	0 150	0 847 4	1 248		Frankenheim.
Ether sulfurique.	0,735 81	−15 38	1 513 2448	2 3592	40 05	Is. Pierre.
Ether sulfureux.	1,106 34	0 60	0 993 4793	1 0904	01 54	*Id.*
Liqueur des Hollandais.	1,280 34	−25 85	1 118 9324	1 0469	10 34	*Id.*
Mercure.	13,596	0 350	0 179 0066	0 0252		Regnault.
Sulfure de carbone. . . .	1,293 12	−35 60	1 139 8038	1 3706	19 12	Is. Pierre.

Tableau de la dilatation apparente de quelques liquides, dans le verre, lorsqu'on élève leur température de 0° à 100°.

DÉSIGNATION DES LIQUIDES.	DILATATIONS APPARENTES EN fractions décimales.	fractions ordinaires.
Eau.	0,0466	1/22
Acide chlorhydrique (densité 1,137).	0,0600	1/17
Acide azotique (densité 1,40).	0,1100	1/9
Acide sulfurique (densité 1,85).	0,0600	1/17
Ether sulfurique.	0,0700	1/14
Huile d'olive et de lin.	0,0800	1/12
Essence de térébenthine.	0,0700	1/14
Eau saturée de sel marin.	0,0500	1/20
Alcool.	0,1100	1/9
Mercure.	0,0156	1/64

482. Dilatation des gaz par la chaleur. D'après les expériences de Gay-Lussac, tous les gaz soumis à une pression constante se dilatent de la même manière, et de $\frac{1}{267} = 0,003\,75$ de leur volume à 0°, par degré centigrade ; mais des expériences, faites par M. Rudberg, ont donné 0,003 646, et d'autres faites par Regnault ont donné pour l'air sec

0,003670, qui diffère peu de 0,003666... $= \frac{11}{3000}$, valeur très commode à employer dans les calculs.

Lorsque le gaz conserve le même volume, et que par suite la dilatation se mesure par l'augmentation de la force élastique, l'observation directe a montré que le coefficient de dilatation n'était pas le même que sous pression constante; l'augmentation de la pression dans le premier cas n'est pas rigoureusement proportionnelle à l'augmentation du volume dans le second. Pour l'air, Regnault ayant admis 0,003665 pour le coefficient de dilatation sous volume constant, on peut dans la pratique le supposer égal au coefficient 0,00367 sous pression constante (483).

Tableau de la dilatation absolue de quelques gaz lorsqu'on porte leur température de 0° à 100°, d'après les expériences de Regnault.

DÉSIGNATION DES GAZ.	DILATATION	
	sous volume constant.	sous pression constante.
Hydrogène	0,3667	0,3661
Air atmosphérique	0,3665	0,3670
Azote	0,3668	»
Oxyde de carbone	0,3667	0,3669
Acide carbonique	0,3688	0,3710
Protoxyde d'azote	0,3676	0,3719
Acide sulfureux	0,3845	0,3903
Cyanogène	0,3829	0,3877

Ces résultats font voir que les coefficients de dilatation des gaz ne sont pas égaux, ce qu'on admettait avant les expériences de Regnault.

Tableau de la dilatation de l'air à différentes pressions, sous volume constant.

PRESSION à 0°	PRESSION à 100°	DENSITÉ de l'air à 0°, en posant = 1 celle de l'air à 0° sous la pression 760 mm.	DILATATION
mm.	mm.		
109,72	149,01	0,1444	0,36482
174,36	237,17	0,2294	0,36513
266,06	395,07	0,3501	0,36542
374,67	510,35	0,4930	0,36587
375,23	510,97	0,4937	0,36572
760,00	....	1,0000	0,36650
1678,40	2286,09	2,2084	0,36760
1692,53	2306,23	2,2270	0,36800
2144,18	2924,04	2,8213	0,36894
3655,56	4992,09	4,8100	0,37091

Résultats analogues fournis par l'acide carbonique.

PRESSION à 0°	PRESSION à 100°	DENSITÉ relative du gaz à 0°	DILATATION.
mm.	mm.		
758,47	1034,54	1,0000	0,36856
901,09	1230,37	1,1879	0,36943
1742,73	2387,72	2,2976	0,37523
3589,07	4759,03	4,7318	0,38598

Dilatation de quelques gaz à différentes pressions, ces pressions restant constantes.

AIR.		HYDROGÈNE.		ACIDE CARBONIQUE.		ACIDE SULFUREUX.	
Pression.	Dilatation.	Pression.	Dilatation.	Pression.	Dilatation.	Pression.	Dilatation.
mm.		mm.		mm.		mm.	
760	0,36706	760	0,36613	760	0,37099	760	0,3902
2525	0,36944	2545	0,36616	2520	0,38455	980	0,3980
2620	0,36964						

L'air atmosphérique suit la même loi de dilatation depuis 0° jusqu'à 350°, lors même que sa force élastique initiale à 0° est inférieure à l'atmosphère; on peut donc employer de l'air à une pression inférieure à $0^m,76$ dans la construction des thermomètres (471, page 607).

483. Influence de la température sur le volume des gaz. On a, en supposant que la pression du gaz reste constante :

$$V' = V\frac{1+at'}{1+at}, \quad \text{et pour l'air} \quad V' = V\frac{1+0,00367\,t'}{1+0,00367\,t}.$$

V volume du gaz à la température t;
V' volume que prend le gaz à la nouvelle température t';
a coefficient de dilatation du gaz;
$1+at$ et $1+at'$ volumes que prend l'unité de volume du gaz à 0°, en passant aux températures t et t'.

Si la pression du gaz, au lieu de rester constante, avait changé, on aurait, en admettant la loi de Mariotte et en représentant par p la pression primitive, et par p' la pression nouvelle :

$$V' = V\frac{p}{p'}\times\frac{1+at'}{1+at}, \quad \text{et pour l'air} \quad V' = V\frac{p}{p'}\times\frac{1+0,00367\,t'}{1+0,00367\,t}. \quad (b)$$

C'est-à-dire que les volumes d'un même gaz ou d'un même poids de ce gaz, à deux températures et à deux pressions différentes, sont entre eux

comme les volumes que prend l'unité de volume à 0° en passant aux deux températures, et en raison inverse des pressions.

Les densités ou les poids Q et Q' du mètre cube du gaz étant en raison inverse des volumes V et V', on a :

$$Q' = Q\,\frac{p'}{p} \times \frac{1 + at}{1 + at'}, \quad \text{et pour l'air} \quad Q' = Q\,\frac{p'}{p} \times \frac{1 + 0{,}003\,67\,t}{1 + 0{,}003\,67\,t'}.$$

Supposant la pression initiale $p = 1$ atm., et la température initiale $t = 0°$, d'où $Q = 1^k{,}293\,187$ pour l'air (464), ces formules deviennent :

$$Q' = Q\,\frac{p'}{1 + at'} \quad \text{et} \quad Q' = \frac{1{,}293\,187\,p'}{1 + 0{,}003\,67\,t'}.$$

Si la pression atmosphérique était représentée par $0^m{,}76$, et la pression p' par une hauteur H de mercure, il suffirait de remplacer p et p' par ces valeurs dans les formules précédentes ; les deux dernières deviendraient :

$$Q' = Q\,\frac{H}{0{,}76(1 + at')} \quad \text{et} \quad Q' = \frac{1{,}293\,187\,H}{0{,}76\,(1 + 0{,}003\,67\,t')}.$$

Si dans cette dernière formule on représente Q' par Q et t' par t, on obtient la formule (A) de la page 645, à l'aide de laquelle nous avons calculé la dernière colonne de la page 646.

Si le volume du gaz restant constant sa température changeait, la formule précédente (*b*) donnerait pour l'air, en admettant que le coefficient de dilatation sous volume constant est égal à 0,003 67 (482) :

$$p' = p\,\frac{1 + 0{,}003\,67\,t'}{1 + 0{,}003\,67\,t}. \qquad (c)$$

Si l'on suppose la température initiale $t = 0°$, on a :

$$p' = p(1 + 0{,}003\,67\,t'), \qquad (d)$$

et si de plus $p = 1$ atmosphère, il vient :

$$p' = 1 + 0{,}003\,67\,t', \quad \text{d'où} \quad t' = \frac{p' - 1}{0{,}003\,67}.$$

La première forme de cette dernière relation montre que pour de l'air dont la pression à 0° est 1 atm., la pression p' augmente de quantités égales pour des accroissements égaux de la température t', et le tableau suivant, calculé avec la 2e forme de cette relation, indique que la température t' augmente de 272°,48 pour chaque augmentation de 1 atm. de la pression p'. Ainsi pour $p' = 1$, on a $t = 0°$; pour $p' = 2$, $t' = 272°{,}48$; $p' = 3$, $t' = 272°{,}48 \times 2$, et ainsi de suite.

Si l'air avait été primitivement à la température t et à la pression p, on aurait calculé p' à l'aide de la formule précédente (*c*), et si l'on suppose $t = 0°$, on a alors recours à la formule (*d*), qui montre que pour $t' = 0°$, $p' = p$, et que pour chaque augmentation de 272°,48 de t', p'

Tableau des températures t' *auxquelles il faut porter de l'air à 0° et sous la pression de 1 atm., son volume restant constant, pour obtenir les pressions* p'.

PRESSION p'	TEMPÉRATURE t'	PRESSION p'	TEMPÉRATURE t'	PRESSION p'	TEMPÉRATURE t'	PRESSION p'	TEMPÉRATURE t'
atm.		atm.		atm.		atm.	
1	0°	2	272°,48	3	544°,96	4	817°,44
1,25	68 ,120	2,25	340 ,60	3,25	613 ,08	4,25	885 ,56
1,50	136 ,24	2,50	408 ,72	3,50	681 ,20	4,50	953 ,68
1,75	204 ,36	2,75	476 ,84	3,75	749 ,32	4,75	1021 ,80
						5	1089 ,92

augmente de p. C'est afin d'augmenter ainsi l'action de la chaleur que, dans les machines à air chaud, avant de chauffer l'air, on le comprime d'abord à une pression p supérieure à une atmosphère.

Si t ne diffère pas sensiblement de 0°, comme lorsqu'il s'agit de l'air à la température de l'atmosphère, au lieu de faire usage de la formule (c), on pourra encore, sans erreur sensible, employer celle (d), en prenant pour t' l'augmentation de la température.

COMPRESSIBILITÉ

484. Compressibilité des gaz. Mariotte avait posé pour tous les gaz la loi très simple : *Les volumes d'une même quantité de gaz dont la température reste constante varient en raison inverse des pressions* (483).

D'après les expériences de Regnault, les gaz ne se comportent pas de la même manière et ne suivent pas tout à fait cette loi.

Regnault a posé les formules suivantes pour représenter les résultats de ses expériences.

Appelant :

$m=\frac{V_0}{V}$ le rapport du volume V_0 d'un gaz sous la pression de $1^m,00$ de mercure, au volume V qu'on lui fait prendre;

P la pression en mètres que prend le gaz réduit au volume V;

A et B des constantes;

on a :

1° Pour l'air atmosphérique,

$$P=m\,[1-A\,(m-1)+B\,(m-1)^2],$$

$$\log A=\bar{3},0435120 \quad \text{et} \quad \log B=\bar{5},2873751\,;$$

2° Pour l'azote,

$$P=m\,[1-A\,(m-1)-B\,(m-1)^2],$$

$$\log A=\bar{4},8389375 \quad \text{et} \quad \log B=\bar{6},8476020\,;$$

3° Pour l'acide carbonique,

$$P = m[1 - A(m-1) - B(m-1)^2],$$
$$\log A = \bar{3},934\,039\,9 \quad \text{et} \quad \log B = \bar{6},862\,472\,1\,;$$

4° Pour l'hydrogène,

$$P = m[1 + A(m-1) + B(m-1)^2],$$
$$\log A = \bar{4},738\,173\,6 \quad \text{et} \quad \log B = \bar{6},925\,078\,7. \qquad (Int.\ 101.,$$

C'est à l'aide de ces formules qu'ont été calculés les résultats du tableau suivant, qui s'écartent, comme on le voit, sensiblement de la loi de Mariotte.

VALEUR de m.	PRESSIONS P CORRESPONDANT AUX VALEURS DE m POUR			
	l'air.	l'azote.	l'acide carbonique.	l'hydrogène.
	m.	m.	m.	m.
1	1,000000	1,000000	1,00000	1,000000
2	1,997828	1,998634	1,98292	2,001110
3	2,993604	2,995944	2,94873	3,003384
4	3,987432	3,991972	3,89736	4,006856
5	4,979440	4,985760	4,82880	5,011645
6	5,969748	5,980350	5,74296	6,017676
7	6,958455	6,972794	6,63985	7,025402
8	7,945696	7,964112	7,51936	8,033944
9	8,934573	8,954364	8,38152	9,044244
10	9,916220	9,943590	9,22620	10,056070
11	10,899724	10,931833	10,05345	11,069454
12	11,882232	11,919120	10,86324	12,084456
13	12,863838	12,905516	11,65541	13,101414
14	13,844670	13,891052	12,43018	14,119504
15	14,824845	14,875770	13,18695	15,139650
16	15,804480	15,859712	13,92608	16,161632
17	16,783675	16,842920	14,64771	17,185470
18	17,762562	17,825436	15,35148	18,211230
19	18,741258	18,807321	16,03733	19,238963
20	19,719880	19,788580	16,70540	20,268720

Il convient de ne pas employer les formules précédentes pour des pressions qui dépassent notablement les plus élevées du tableau, limites auxquelles se sont élevées les expériences de Regnault.

Désignant par $z_1 - z_0$ la différence de niveau de deux points de l'atmosphère, par h la hauteur observée du baromètre au niveau z_0, et par $(h - \Delta h)$ la hauteur que marquerait ce même baromètre au niveau z_1, on peut, à cause de la faible valeur de la correction, admettre la formule réduite:

$$z_1 - z_0 = 18\,393^{\text{m}} \times \log \frac{h}{h - \Delta h}.$$

En supposant h égal constamment à $0^{\text{m}},760$, la formule donne les résultats suivants :

(z_1-z_0)	Δh	(z_1-z_0)	Δh	(z_1-z_0)	Δh	(z_1-z_0)	Δh
mètres.	millim.	mètres.	millim.	mètres.	millim.	mètres.	millim.
1	0,095	7	0,666	13	1,236	19	1,806
2	0,190	8	0,761	14	1,331	20	1,901
3	0,285	9	0,856	15	1,426	21	1,997
4	0,380	10	0,951	16	1,521	22	2,092
5	0,475	11	1,046	17	1,616	23	2,187
6	0,571	12	1,141	18	1,711	24	2,282
						25	2,375

Ces différences de pressions ont été déterminées pas Regnault dans ses expériences sur la compressibilité des gaz, pour tenir compte de la variation de la pression atmosphérique par suite de la variation du niveau du mercure dans le manomètre.

Regnault a aussi déterminé l'influence due à l'augmentation de densité du mercure par suite de sa compressibilité. Appelant :

$\mu = 0{,}00000463$ le coefficient de compressibilité du mercure sous la pression d'une colonne de mercure de 1 mètre;

h la hauteur de la colonne de mercure normal, c'est-à-dire de mercure à 0° sous la pression atmosphérique, qui fait équilibre à la colonne z,

on a :

$$h - z = \frac{\mu}{2}(z - 1{,}52)z;$$

formule qui donne les résultats suivants :

z	$h-z$	z	$h-z$	z	$h-z$	z	$h-z$
mètres.	millim.	mètres.	millim.	mètres.	millim.	mètres.	millim.
1	−0,0012	7	0,0886	14	0,4036	21	0,9450
1,52	0,0000	8	0,1198	15	0,4671	22	1,0406
2	+0,0024	9	0,1555	16	0,5352	23	1,1413
3	0,0102	10	0,1959	17	0,6079	24	1,2463
4	0,0229	11	0,2409	18	0,6853	25	1,3560
5	0,0402	12	0,2904	19	0,7672		
6	0,0619	13	0,3448	20	0,8538		

On voit que ces corrections sont très faibles et qu'on peut les négliger dans la pratique. (*Int.* 1393.)

485. Compressibilité des solides et des liquides. Poisson, dans ses recherches sur l'élasticité, a posé la formule :

$$k = \frac{3a}{2}.$$

a allongement que subit un cylindre d'une matière quelconque homogène, lorsqu'une de ses bases est fixe et que l'autre est tirée dans le sens de sa longueur par une force égale à P sur chaque unité de surface;

k compression cubique que subit ce même cylindre lorsqu'il est soumis sur toute sa surface à une pression égale à P sur chaque unité de surface.

Tableau des valeurs de a *d'une tige de 1 mètre de longueur, pour une traction égale à une atmosphère, c'est-à-dire pour* P $= 0^k.010298$ *par millimètre de section, et de celles de* k, *calculées d'après la formule précédente.*

OPÉRATEURS.	MATIÈRES.	VALEURS de *a*.	VALEURS de *k*.
Colladon et Sturm.	Verre.	0,000001 0298	0,000001 5447
Savart.	Verre.	0,000001 7137 0,000001 7007	0,000002 5705 0,000002 5510
Wertheim. et Chevandier.	Verre à vitre de Saint-Quirin. . .	0,000001 3008	0,000001 9512
	Glace de Cirey.	0,000001 4680	0,000002 2020
	Verre à gobeleterie de Valéristhal.	0,000001 4946	0,000002 2419
	Cristal blanc de Baccarat.	0,000001 8822	0,000002 8233
Wertheim.	Cuivre écroui et étiré.	0,000000 828	0,000001 242
	Id. *id.* et recuit. .	0,000000 980	0,000001 469
	Laiton.	0,000001 013	0,000001 518

D'après les expériences de Regnault, appelant :

δ la compressibilité apparente ;

μ et k les compressibilités absolues du liquide et de l'enveloppe, calculées d'après les formules de Lamé (397),

on a en moyenne, pour une pression d'une atmosphère, les valeurs du tableau suivant :

LIQUIDES.	VALEURS de δ.	VALEURS de μ.	VALEURS de k.
Eau dans une sphère en cuivre rouge.	0,000046 392	0,000047 709	0,000001 317
Id. *id.* en laiton. . . .	0,000046 847	0,000048 288	0,000001 440
Id. dans un cylindre de verre ordin.	0,000044 304	0,000046 677	0,000002 368
Mercure dans *id.*	0,000001 234	0,000003 517	0,000002 374

Pour l'eau, la valeur de μ devant évidemment être la même quelle que soit l'enveloppe, comme les différences trouvées sont trop considérables pour qu'on puisse les attribuer aux erreurs d'observation, il faut admettre, ou que les formules mathématiques ne représentent pas exactement le phénomène, ou bien que les expériences ne réalisent pas convenablement les conditions admises dans l'établissement des formules.

La compressibilité du mercure, sous une charge égale au poids d'une colonne de mercure d'un mètre, est :

$$\mu' = 0,000004628.$$

Regnault a conclu de ses expériences que la chaleur dégagée par

une pression subite de 10 atmosphères sur l'eau est incapable d'élever sa température de 1/50 de degré centigrade.

CHALEUR SPÉCIFIQUE

486. Unité de chaleur. On appelle unité de chaleur ou calorie, la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1° la température de 1 kilogramme d'eau (page 636).

487. Chaleur spécifique. La chaleur spécifique ou capacité calorifique d'un corps est le nombre d'unités de chaleur nécessaire pour élever d'un degré la température d'un kilogramme de ce corps (492).

Tableau des chaleurs spécifiques de quelques corps.

DÉSIGNATION DES CORPS.	OPÉRATEURS.	CHALEURS spécifiques.
Chaux vive	Lavoisier et Laplace.	0,2169
Huile d'olive	*Id.*	0,3096
Acide sulfurique (densité 1,87)	*Id.*	0,3346
Acide azotique (densité 1,30)	*Id.*	0,6614
Vinaigre	Dalton.	0,9200
Acide chlorhydrique (densité 1,53)	*Id.*	0,600
Alcool (densité 0,81)	*Id.*	0,700
— (densité 0,793)	*Id.*	0,622
Éther sulfurique (densité 0,76)	*Id.*	0,660
— — (densité 0,715)	Despretz.	0,520
Essence de térébenthine (densité 0,872)	*Id.*	0,472
Bois de pin	Mayer.	0,650
Bois de chêne	*Id.*	0,570
Bois de poirier	*Id.*	0,500
Flint-glass	Dalton.	0,190
Chlorure de sodium	*Id.*	0,230
Mercure, de 0° à 100°	Dulong et Petit.	0,0330
— de 0 à 300	*Id.*	0,0350
Platine, de 0 à 100	*Id.*	0,0335
— de 0 à 300	*Id.*	0,0355
Antimoine, de 0 à 100	*Id.*	0,0507
— de 0 à 300	*Id.*	0,0547
Argent, de 0 à 100	*Id.*	0,0557
— de 0 à 300	*Id.*	0,0611
Zinc, de 0 à 100	*Id.*	0,0927
— de 0 à 300	*Id.*	0,1015
Cuivre, de 0 à 100	*Id.*	0,0940
— de 0 à 300	*Id.*	0,1013
Fer, de 0 à 100	*Id.*	0,1098
— de 0 à 200	*Id.*	0,1150
— de 0 à 300	*Id.*	0,1218
— de 0 à 350	*Id.*	0,1255
Verre, de 0 à 100	*Id.*	0,1770
— de 0 à 300	*Id.*	0,1900
Platine, 100°	Pouillet.	0,03350
— 300	*Id.*	0,03434
— 500	*Id.*	0,03518
— 700	*Id.*	0,03600
— 1000	*Id.*	0,03718
— 1200	*Id.*	0,03818

Tableau des chaleurs spécifiques de quelques corps, de 0° à 100°, d'après M. Regnault.

DÉSIGNATION DES CORPS.	CHALEURS spécifiques.
Fer.	0,11379
Zinc.	0,09555
Cuivre.	0,09515
Cadmium.	0,05669
Argent.	0,05701
Arsenic.	0,08140
Plomb.	0,03140
Bismuth.	0,03084
Antimoine.	0,05077
Étain des Indes	0,05623
— anglais.	0,05695
Nickel.	0,10863
Cobalt.	0,10696
Platine laminé.	0,03243
— en mousse.	0,03293
Palladium.	0,05927
Or.	0,03244
Soufre.	0,20259
Iode.	0,05412
Sélénium.	0,0837
Tellure.	0,05155
Urane.	0,06190
Tungstène.	0,03636
Molybdène.	0,07218
Nickel carburé.	0,11192
— plus carburé.	0,11631
Cobalt carburé.	0,11714
Acier Haussmann.	0,11848
Fine-metal.	0,12728
Fonte de fer blanche de Bourgogne.	0,12983
Charbon.	0,24111
Phosphore de 10° à 30°.	0,1887
Phosphore de 0° à 100°.	0,25034
— avec chaleur de fusion comprise.	0,25250
Iridium impur.	0,1887
Manganèse très carburé.	0,14411
Mercure.	0,03332
Verre.	0,19768
ALLIAGES ET OXYDES.	
Laiton.	0,09391
Plomb 1 at., étain 1 at.	0,04073
— 1 at., étain 2 at.	0,04506
— 1 at., antimoine 1 at.	0,03880
Bismuth 1 at., étain 1 at.	0,04000
— 1 at., étain 2 at.	0,04504
— 1 at., étain 2 at. et antimoine 1 at.	0,04621
Bismuth 1 at., étain 2 at., antimoine 1 at., zinc 2 at.	0,05657
Plomb 1 at., étain 2 at., bismuth 1 at.	0,04476
Plomb 1 at., étain 2 at., bismuth 2 at.	0,06082

DÉSIGNATION DES CORPS.	CHALEURS spécifiques.
Mercure 1 at., étain 1 at.	0,07294
— 1 at., étain 2 at.	0,06591
— 1 at., plomb 1 at.	0,03827
Protoxyde de plomb en poudre	0,05118
Protoxyde de plomb fondu.	0,05089
Oxyde de mercure.	0,05179
Protoxyde de manganèse.	0,15701
Oxyde de cuivre.	0,14201
— de nickel.	0,16234
— de nickel calciné à la forge.	0,15885
Magnésie.	0,24394
Oxyde de zinc.	0,12480
Peroxyde de fer (fer oligiste).	0,16695
Colcotar peu calciné.	0,17569
— calciné une deuxième fois.	0,17167
— fortement calciné.	0,16921
— fortement calciné une deuxième fois	0,16707
Acide arsénieux.	0,12786
Oxyde de chrome.	0,17960
— de bismuth.	0,06053
— d'antimoine.	0,09009
Alumine (corindon).	0,19762
— (saphir).	0,21732
Acide stannique.	0,09326
— titanique artificiel.	0,17164
— titanique (rutile).	0,17032
— antimonieux.	0,09535
— tungstique.	0,07983
— molybdique.	0,13240
— silicique.	0,19132
— borique.	0,23743
Oxyde de fer magnétique.	0,16780
Protosulfure de fer.	0,13570
Sulfure de nickel.	0,12813
— de cobalt.	0,12512
— de zinc.	0,12303
— de plomb.	0,05086
— de mercure.	0,05117
Protosulfure d'étain.	0,08365
Sulfure d'antimoine.	0,08403
— de bismuth.	0,06002
Bisulfure de fer (pyrite).	0,13009
— d'étain.	0,11932
Sulfure de molybdène.	0,12334
— de cuivre.	0,12118
— d'argent.	0,07460
Pyrite magnétique.	0,16023
Chlorure de sodium.	0,21401
— de potassium.	0,17295
Protochlorure de mercure.	0,05205
— de cuivre.	0,13827
Chlorure d'argent.	0,09109
— de baryum.	0,08957
— de strontium.	0,11990

DÉSIGNATION DES CORPS.	CHALEURS spécifiques	DÉSIGNATION DES CORPS.	CHALEURS spécifiques
Chlorure de calcium	0,16420	Marbre saccharoïde gris	0,20989
— de magnésium	0,19460	— — blanc	0,21585
— de plomb	0,06641	Craie blanche	0,21485
Protochlorure de mercure	0,06889	Carbonate de baryte	0,11038
Chlorure de zinc	0,13618	— de strontiane	0,14483
Perchlorure d'étain	0,10161	— de fer	0,19345
Chlorure de manganèse	0,14255	— de plomb	0,08596
Chloride d'étain	0,14759	Dolomie	0,21743
— de titane	0,19145	Noir animal	0,26085
Chlorure d'arsenic	0,17604	Charbon de bois	0,24150
— de phosphore	0,20922	Coke du canel-coal	0,20307
Bromure de potassium	0,11322	— de la houille	0,20085
— d'argent	0,07391	Charbon de l'anthracite du pays de Galles	0,20172
— de sodium	0,13842		
— de plomb	0,05326	Charbon de l'anthracite de Philadelphie	0,20100
Iodure de potassium	0,08191		
— de sodium	0,08684	Graphite naturel	0,20187
Protoiodure de mercure	0,03949	— des hauts fourneaux	0,49702
Iodure d'argent	0,06159	— des cornues à gaz	0,20360
Protoiodure de cuivre	0,06869	Diamant	0,14687
Iodure de plomb	0,04267	Térébenthine	0,4672
— de mercure	0,04197	Térébène	0,4656
Fluorure de calcium	0,21492	Térébilène	0,4580
Nitrate de potasse	0,23875	Camphilène	0,4518
— de soude	0,27821	Essence de citron	0,4879
— d'argent	0,14352	— d'orange	0,4886
— de baryte	0,15228	— de genièvre	0,4770
Chlorate de potasse	0,20956	Pétrolène	0,4684
Phosphate de potasse	0,19102	Acier doux	0,1165
— de soude	0,22833	— trempé	0,1175
— de plomb (P^2O^5		Métal des cymbales, aigre	0,0858
$+ 2RO$)	0,08208	— — doux trempé	0,0862
— de plomb (P^2O^5		Larmes bataviques dures	0,1923
$+ 3RO$)	0,07982	— — recuites	0,1937
Métaphosphate de chaux	0,19923	Soufre cristallisé naturel	0,1776
Arséniate de potasse	0,15631	— fondu depuis 2 ans	0,1764
— de plomb	0,07280	— fondu depuis 2 mois	0,1803
Sulfate de potasse	0,19010	— fondu récemment	0,1844
— de soude	0,23115	Essence de térébenthine	0,4160
— de baryte	0,11285	Dissolution de chlorure de calcium	0,6448
— de strontiane	0,14279		
— de plomb	0,08723	Alcool ordinaire à 36° n° 1	0,6588
— de chaux	0,19656	— plus étendu n° 2	0,8413
— de magnésie	0,22159	— encore plus étendu n° 3	0,9402
Chromate de potasse	0,18505	Acide acétique concentré non cristallisé	0,6501
Bichromate de potasse	0,18937		
Borate de potasse	0,21975		
— de soude	0,23823	DE 15° À 20°.	
— de plomb (B^2O^6+RO)	0,11409		
— de potasse	0,20478	Mercure	0,0290
— de soude	0,25709	Benzine	0,3932
— de plomb (B^2O^6+2RO)	0,09046	Chlorure de silicium	0,1904
Wolfram	0,09780	Sulfure de carbone	0,2206
Zircon	0,14558	Éther	0,5157
Carbonate de potasse	0,21623	Éther sulfhydrique	0,4772
— de soude	0,27275	Alcool	0,6148
— de chaux (spath		Éther oxalique	0,4554
d'Islande)	0,20858	Esprit de bois	0,6009
Aragonite	0,20850	Chlorure de soufre	0,2038

Pour un même corps, la chaleur spécifique est plus grande à l'état liquide qu'à l'état solide :

Eau	liquide. .	1,0	Brome	liquide. .	0,111	Mercure	liquide. .	0,0333
	solide . .	0,5		solide . .	0,084		solide . .	0,0319

La chaleur spécifique d'un même corps est à peu près constante pour des températures inférieures à 100°; mais au-dessus elle croît sensiblement avec la température, et surtout au point où le corps commence à se ramollir. La chaleur spécifique d'un même corps diminue à mesure que l'état d'agrégation de ce corps devient plus grand. Cependant Dulong, en comparant les chaleurs spécifiques des corps simples aux poids atomiques (459) de ces mêmes corps, a posé la loi : *Les chaleurs spécifiques des corps simples sont en raison inverse de leurs poids atomiques;* d'où il résulte que les produits des chaleurs spécifiques par les poids atomiques sont un nombre constant; c'est en effet ce que vérifient sensiblement les résultats donnés par l'expérience.

Neumann a posé une loi semblable à la précédente pour les corps composés ; elle est : *Pour chaque classe des corps composés ayant la même composition atomique et de constitution chimique semblable, les chaleurs spécifiques sont en raison inverse des poids atomiques.* Cette loi a été vérifiée par les expériences de Regnault, desquelles il résulte aussi que la chaleur spécifique d'un alliage est sensiblement la somme des quantités de chaleur nécessaires pour élever séparément de 1° la température de chaque quantité de métal qui entre dans 1 kilog. de l'alliage.

Regnault a fait des expériences pour déterminer la chaleur spécifique de l'eau à différentes températures. A l'aide de ses résultats, il a calculé une formule d'interpolation qui donne le nombre Q d'unités de chaleur absorbées par 1 kilog. d'eau quand on porte sa température de 0° à T°, en appelant *unité de chaleur* la chaleur qu'absorbe 1 kilog. d'eau à 0° pour s'échauffer de 1°.

Cette formule est :

$$Q = T + AT^2 + BT^3. \qquad (a)$$

$A = 0{,}00002$ et $B = 0{,}0000003$ constantes déterminées pour les valeurs d'expérience $Q = 100{,}5$ et $Q = 203{,}3$, qui correspondent à $T = 100°$ et $T = 200°$.

La formule précédente revient donc à :

$$Q = T + 0{,}00002\,T^2 + 0{,}0000003\,T^3.$$

La quantité de chaleur que 1 kilog. d'eau absorbe quand sa température passe de T° à (T + 1)°, en supposant que pour chaque élément dT de ce degré l'absorption de chaleur soit la même, est donnée par la formule :

$$\frac{dQ}{dT} = 1 + 0{,}00004\,T + 0{,}0000009\,T^2.$$

La quantité $\frac{dQ}{dT}$ est la tangente à la courbe représentée par l'équa-

tion (*a*), c'est-à-dire à la courbe dont les abscisses sont les valeurs de T correspondantes aux valeurs de Q (tangente au point correspondant à la valeur de T) (page 611).

C'est à l'aide de ces deux formules qu'a été calculé le tableau suivant, dont les résultats sont donnés par les températures de 10° en 10° à partir de 0°.

TEMPÉRATURE du thermomètre à air T	VALEUR de Q	CHALEUR spécifique moyenne de l'eau entre 0° et T°	CHALEUR SPÉCIFIQUE de l'eau de T° à (T + dT)° $\frac{dQ}{dT}$
0°	0,000	»	1,0000
10	10,002	1,0002	1,0005
20	20,010	1,0005	1,0012
30	30,026	1,0009	1,0020
40	40,051	1,0013	1,0030
50	50,087	1,0017	1,0042
60	60,137	1,0023	1,0056
70	70,210	1,0030	1,0072
80	80,282	1,0035	1,0089
90	90,381	1,0042	1,0109
100	100,500	1,0050	1,0130
110	110,641	1,0058	1,0153
120	120,806	1,0067	1,0177
130	130,997	1,0076	1,0204
140	141,215	1,0087	1,0232
150	151,462	1,0097	1,0262
160	161,741	1,0109	1,0294
170	172,052	1,0121	1,0328
180	182,398	1,0133	1,0364
190	192,779	1,0146	1,0401
200	203,200	1,0160	1,0440
210	213,660	1,0174	1,0481
220	224,162	1,0189	1,0524
230	234,708	1,0204	1,0568

488. Chaleur spécifique des gaz et des vapeurs. La chaleur spécifique d'un gaz n'est pas la même suivant que ce gaz, en changeant de température, peut changer de volume de manière à rester à une pression constante, ou selon qu'il conserve le même volume malgré la variation de température, qui change alors sa force élastique.

C'est la chaleur spécifique sous pression constante qui se rapporte à la définition donnée pour la chaleur spécifique des solides et des liquides, et c'est la seule qui ait pu jusqu'à présent être déterminée directement par l'expérience.

D'après les expériences de Regnault, la chaleur spécifique de l'air à pression constante ne varierait pas avec la température, et il paraît en être de même avec la pression depuis une jusqu'à dix atmosphères. Plusieurs autres gaz soumis à l'expérience ont donné des résultats analogues.

Tableau des chaleurs spécifiques de quelques fluides élastiques sous pression constante, d'après Regnault. Les premières valeurs correspondent à un kilog. des fluides, et celles de la dernière colonne, qui ont été obtenues en multipliant les premières valeurs par les densités des fluides par rapport à l'air, donnent les chaleurs spécifiques relatives des fluides pour des volumes égaux de fluides.

DÉSIGNATION DES FLUIDES.	CHALEURS SPÉCIFIQUES	
	en poids.	en volume.
Air entre — 30° et + 10°	0,2377	0,2378
Id. 10° et 100°	0,2379	
Id. 100° et 225°	0,2376	
Oxygène	0,2182	0,2412
Azote	0,2440	0,2370
Hydrogène	0,4046	0,2356
Chlore	0,1214	0,2962
Brome	0,05518	0,2992
Protoxyde d'azote	0,2238	0,3413
Deutoxyde d'azote	0,2315	0,2406
Oxyde de carbone	0,2479	0,2399
Acide carbonique	0,2164	0,3308
Sulfure de carbone	0,1575	0,4146
Acide sulfureux	0,1553	0,3489
Id. chlorhydrique	0,1845	0,2302
Id. sulfhydrique	0,2423	0,2886
Gaz ammoniac	0,5080	0,2994
Hydrogène protocarboné	0,5929	0,3277
Id. bicarboné	0,3694	0,3572
Vapeur d'eau	0,4750	0,2950
Id. d'alcool	0,4513	0,7171
Id. d'éther	0,4810	1,2296
Id. *id.* chlorhydrique	0,2737	0,6117
Id. *id.* bromhydrique	0,1816	0,6777
Id. *id.* sulfhydrique	0,4005	1,2568
Id. *id.* cyanhydrique	0,4255	0,8293
Id. de chloroforme	0,1568	0,8310
Liqueur des Hollandais	0,2293	0,7911
Éther acétique	0,4008	1,2184
Vapeur d'acétone	0.4125	0,8341
Id. de benzine	0,3754	1,0114
Essence de térébenthine	0,5061	2,3776
Vapeur de chlorure phosphoreux	0,1346	0,6386
Id. *id.* arsénieux	0,1122	0,7013
Id. *id.* de silicium	0,1329	0,7788
Id. *id.* d'étain	0,0939	0,8639
Id. *id.* de titane	0,1263	0,8634

La chaleur spécifique 0,475 de la vapeur d'eau n'est guère que la moitié de ce qu'avaient trouvé MM. Delaroche et Bérard ; elle est à peu près égale à celle de la glace (489), et moitié de celle de l'eau.

c étant la chaleur spécifique d'un gaz à pression constante, et c' la chaleur spécifique de ce même gaz à volume constant, on doit avoir $c > c'$; car après avoir dépensé c' unités de chaleur pour augmenter de 1° la température de 1 kilog. de gaz sous volume constant, si l'on veut amener ce gaz à sa pression primitive, il faudra augmenter son volume, c'est-à-dire refouler l'air atmosphérique qui le comprime de toute part;

d'où résultera une dépense de travail mécanique qui ne pourra être effectuée que par une nouvelle dépense c'' de chaleur qui s'ajoutera à la première c', et l'on aura $c = c' + c''$.

D'après Dulong, le rapport $\frac{c'}{c}$ serait égal à 1,421 pour l'air, l'oxygène et l'hydrogène, à 1,338 pour l'acide carbonique, à 1,343 pour l'azote, et à 1,240 pour le gaz oléfiant.

Clément Desormes, en ramenant par compression l'air dilaté à son volume primitif, de l'élévation de température qui en est résultée a conclu $\frac{c}{c'} = 1,348$.

Masson, en laissant au contraire dilater l'air comprimé jusqu'à ce qu'il ait repris sa pression initiale, de l'abaissement de température, a conclu $\frac{c}{c'} = 1,41$. Ce nombre 1,41 est précisément celui qui résulte de la théorie de l'équivalent mécanique de la chaleur, en prenant pour travail produit celui qui est employé pour dilater le gaz en refoulant l'atmosphère, de manière à ramener le gaz à sa pression initiale.

CHALEUR LATENTE

489. Chaleur latente de fusion. Lorsqu'un solide se liquéfie, il absorbe une grande quantité de chaleur sans que sa température augmente; cette quantité de chaleur prend le nom de *calorique de liquidité*, de *chaleur latente de liquidité* ou de *chaleur latente de fusion.*

Tableau des températures de fusion et des chaleurs spécifiques et chaleurs latentes de liquidité de quelques corps, en unités de chaleur (486), d'après Person.

DÉSIGNATION DES CORPS.	TEMPÉRATURE de fusion.		CHALEUR spécifique à l'état		CHALEUR latente.
			liquide.	solide.	
1° *Non métalliques.*					
Eau	0°		1,0000	0,5040	79,25
Phosphore	44 ,2		0,2045	0,1788	5,03
Soufre	115 ,0		0,2340	0,2026	9,37
Azotate de soude	310 ,5		0,4130	0,2782	62,98
Azotate de potasse	339 ,0		0,3319	0,2388	47,37
Chlorure de calcium	28 ,5		0,5550	0,3450	40,70
Phosphate de soude	36 ,1		0,7467	0,4077	66,80
	Thermomètre				
2° *Métalliques.*	à mercure.	à air.			
Étain	235°,0	232°,7	0,0637	0,0562	14,25
Bismuth	270 ,5	266 ,8	0,0363	0,0308	12,64
Plomb	334 ,0	326 ,2	0,0402	0,0314	5,37
Zinc	433 ,3	415 ,3	»	0,0956	28,13
Cadmium	328 ,0	320 ,7	0,0642	0,0567	13,58
Argent	»	»	»	0,0570	21,07

Les corps, en passant de l'état liquide à l'état solide, dégagent une quantité de chaleur égale à celle qu'ils ont absorbée en se liquéfiant, et leur température reste constante tant qu'il y a du liquide à solidifier.

490. Chaleur latente de vaporisation. Lorsqu'on vaporise un liquide, il absorbe une très grande quantité de chaleur, et sa température, qui est aussi celle de la vapeur, reste constante tant qu'il y a du liquide à vaporiser; cette quantité de chaleur absorbée prend le nom de *calorique de vaporisation* ou de *chaleur latente de vaporisation* (492).

Tableau de la chaleur latente de vaporisation de quelques liquides, et de la quantité totale de chaleur absorbée pour amener 1 kilogramme de ces liquides de 0° à la température d'ébullition et le vaporiser, d'après Despretz.

DÉSIGNATION DES LIQUIDES.	CHALEUR latente.	CHALEUR totale absorbée, en unités de chaleur.
Eau	531	631
Alcool	207	255
Ether sulfurique	96,8	109,3
Essence de térébenthine	76,8	149,2

Les physiciens ne sont pas d'accord dans l'évaluation de la chaleur latente de vaporisation de l'eau : Rumfort la suppose égale à 557; Dulong, à 543; Clément Desormes, à 550; Southern, à 530, et Watt, à 527.

D'après Southern, la chaleur latente de vaporisation de l'eau est constante, de sorte que la quantité de chaleur totale contenue dans la vapeur croît avec la température; ainsi un kilogramme de vapeur à 135° contient 530 + 135 unités de chaleur. D'après Clément Desormes, au contraire, la quantité totale de chaleur absorbée pour échauffer et vaporiser un kilogramme d'eau à 0° est toujours de 650 unités, quelle que soit la température de la vapeur; ainsi, à 135°, la chaleur latente de la vapeur est 650 — 135 = 515 unités. Des expériences faites par Pambour tendent à confirmer la loi de Clément Desormes, que l'on admettait dans la pratique.

Regnault a fait des expériences pour déterminer la chaleur latente de la vapeur d'eau. Ses résultats sont représentés d'une manière satisfaisante par la formule :

$$L = A + BT.$$

L chaleur totale, en unités (486), renfermée dans un kilogramme de vapeur saturée à la température T°;

A = 606,5 et B = 0,305 quantités constantes, déterminées pour deux observations où la température T était 100° et 195°.

La formule précédente peut donc s'écrire :

$$L = 606{,}5 + 0{,}305\,T.$$

Cette formule fait voir que la chaleur totale renfermée dans un kilogramme de vapeur saturée à T° est égale à la quantité de chaleur qu'un kilogramme de vapeur saturée à 0° abandonne en passant à l'état d'eau liquide à 0°, augmentée du produit 0,305 T.

La fraction 0,305 est donc une *capacité calorifique particulière* de la vapeur d'eau, différente des capacités calorifiques des gaz à volume constant, ou à pression constante, mais en relation intime avec ces dernières (488). C'est la quantité de chaleur qu'il faut fournir à un kilogramme de vapeur saturée pour élever sa température de 1°, quand on comprime en même temps cette vapeur de manière à la maintenir à l'état de saturation.

C'est à l'aide de cette formule que les chaleurs totales du tableau suivant ont été calculées. De ces chaleurs totales, retranchant les nombres Q d'unités de chaleur absorbée pour porter l'eau de 0° à T° (page 637), on a les chaleurs latentes de vaporisation *l*, consignées dans la dernière colonne de la table.

TEMPÉRATURE de la vapeur saturée T	CHALEUR totale L	CHALEUR latente *l*	TEMPÉRATURE de la vapeur saturée T	CHALEUR totale L	CHALEUR latente *l*
0°	606,5	606,5	120°	643,1	522,3
10	609,5	599,5	130	646,1	515,1
20	612,6	592,6	140	649,2	508,0
30	615,7	585,7	150	652,2	500,7
40	618,7	578,7	160	655,3	493,6
50	621,7	571,6	170	658,3	486,2
60	624,8	564,7	180	661,4	479,0
70	627,8	557,6	190	664,4	471,6
80	630,9	550,6	200	667,5	464,3
90	633,9	543,5	210	670,5	456,8
100	637,0	536,5	220	673,6	449,4
110	640,0	529,4	230	676,6	441,9

Chaleur de vaporisation. On a vu ci-dessus que, d'après les expériences de Regnault, la chaleur nécessaire pour porter un kilogramme d'eau de 0° à T° est exprimée par la formule :

$$L = 606,5 + 0,305\,T.$$

D'autre part, la chaleur totale L nécessaire pour transformer un kilogramme d'eau à 0° en vapeur saturée à T degrés comprend la chaleur Q nécessaire à échauffer l'eau de 0° à T° et la chaleur de vaporisation *v*.

On a :

$$L = Q + v \quad \text{d'où} \quad v = L - Q.$$

Mais, d'après Regnault, on a :

$$Q = T + 0,00002\,T^2 + 0,000000\,T^3;$$

par suite :

$$v = 606,5 - 0,695\,T - 0,00002\,T^2 - 0,0000003\,T^3.$$

491. *Tableau des températures d'ébullition de quelques matières, sous la pression atmosphérique* (476 et 492).

DÉSIGNATION DES MATIÈRES.	TEMPÉRATURE en degrés centigr.	DÉSIGNATION DES MATIÈRES.	TEMPÉRATURE en degrés centigr.
Eau.	100°,0	Diss. sat. de nitre.	115°,6
Éther sulfurique.	37 ,8	*Id.* de tartre.	116 ,7
Sulfure de carbone.	47 ,0	*Id.* de nitrate d'ammoniaque.	125 ,3
Carbure d'hydrogène.	225 ,0	*Id.* de sous-carbonate de potasse.	140 ,0
Esprit de bois.	65 ,5	Essence de térébenthine.	157 ,0
Alcool.	78 ,4	Phosphore.	290 ,0
Chloroforme.	60 ,3	Soufre.	299 ,0
Benzine.	80 ,1	Acide sulfurique.	310 ,0
Diss. sat. de sulfate de soude.	100 ,7	Huile de lin.	316 ,0
Id. d'acétate de plomb.	102 ,0	Mercure.	360 ,0
Id. de chlorure de sodium	106 ,9		
Id. de chlorhydrate d'ammoniaque.	114 ,4		

492. *Tableau des températures d'ébullition* (491), *des chaleurs spécifiques* (487) *et des chaleurs latentes de vaporisation de quelques liquides* (490), *d'après Favre et Silbermann, et des quantités totales de chaleur absorbées pour amener* 1 *kilogramme de ces liquides de* 0° *à la température d'ébullition et le vaporiser sous la pression atmosphérique* 0m,76.

SUBSTANCES.	TEMPÉRATURE d'ébullition.	CHALEUR spécifique.	CHALEUR latente.	CHALEUR totale.
Eau.	100°	1	536	636
Carbure d'hydrogène.	225	0,495	60	171
Esprit de bois.	66,5	0,67	264	309
Alcool absolu.	78	0,64	208	258
Alcool valérique.	»	0,59	121	»
Alcool éthalique.	»	0,51	58	»
Éther sulfurique.	38	0,50	91	110
Éther valérique.	113,5	0,52	69	128
Acide formique.	100	0,65	169	234
Acide acétique.	120	0,51	102	163
Acide butyrique.	164	0,41	115	182
Acide valérique.	175	0,48	104	188
Éther acétique.	74	0,48	106	142
Butyrate de méthylène.	93	0,49	87	133
Essence de térébenthine.	156	0,47	69	142
Térébène.	156	0,52	67	148
Essence de citron.	165	0,50	70	153

VAPEURS

493. Propriétés de la vapeur. La vapeur non saturée se comporte comme un gaz, quand on fait varier sa température et son volume dans les limites qui ne l'amènent pas à saturation (482 à 484).

La vapeur saturée, c'est-à-dire celle qui est au maximum de tension et de densité correspondant à la température à laquelle elle se trouve, n'étant pas en contact avec du liquide, si l'on augmente son volume, on diminue sa densité, sa tension et sa température ; si au contraire on diminue son volume, on augmente sa densité, sa tension et sa température, et il est probable qu'il y a de la vapeur condensée ; cela suppose qu'il n'y a ni gain ni perte de chaleur par l'enveloppe qui renferme la vapeur. D'après Clément Desorme et Pambour, il n'y aurait pas condensation, et la vapeur resterait toujours saturée quoiqu'on augmentât ou qu'on diminuât son volume (490).

La vapeur en contact avec le liquide qui la forme est toujours saturée au maximum de densité et de pression correspondant à la température du liquide ; il y a vaporisation ou condensation suivant qu'on augmente ou qu'on diminue son volume, et, par suite, absorption ou production de chaleur ; ce qui diminue ou augmente la température du liquide, quand toutefois il n'y a ni gain ni perte de chaleur par l'enveloppe.

494. Relation entre la température et la force élastique de la vapeur d'eau. Avant 1830, on ne connaissait la force élastique de la vapeur que pour des températures ne s'élevant pas au-dessus de 172°,13, ce qui correspondait à 8 atmosphères de pression ; mais à cette époque Dulong et Arago poussèrent les expériences jusqu'à la température de 224°,20, qu'ils trouvèrent correspondre à la force élastique de 24 atmosphères. Nous ne donnerons pas le tableau des résultats obtenus, tableau dont les chiffres correspondant à des températures inférieures à 100 degrés sont dus à Gay-Lussac. Mais disons que pratiquement on peut considérer ces résultats comme étant identiques à ceux que Regnault a obtenus depuis.

Dans ses expériences, Regnault a déterminé la force élastique de la vapeur d'eau aux températures de — 32° à + 230°. Les résultats qu'il a obtenus sont représentés avec beaucoup d'exactitude par les formules d'interpolation suivantes :

1° Pour les températures de — 32° à 0°,

$$H = a + b\alpha^x. \qquad (a)$$

H force élastique, en millimètres de mercure ;
$a = -0{,}08038$ quantité constante ;
b constante, $\log b = \bar{1}{,}6024724$;
α constante, $\log \alpha = 0{,}0333980$;
$x = t + 32$, t étant la température de la vapeur indiquée par le thermomètre à air en degrés centigrades, t est négatif.

2° Pour les températures de 0° à 100°,

$$\log H = a + b\alpha_1^t - c\beta_1^t. \qquad (b)$$

$$a = 4{,}7384380, \quad \log b = \bar{2}{,}1340339, \quad \log c = 0{,}6116485,$$
$$\log \alpha_1 = 0{,}006865036, \quad \log \beta_1 = \bar{1}{,}9967249.$$

3° Pour les températures de 100° à 230°;

$$\log H = a - b\alpha_1^x - c\beta_1^x, \qquad (c)$$

$$a = 6{,}2640348, \quad \log b = 0{,}1397743, \quad \log c = 0{,}6924351,$$

$$\log \alpha_1 = \bar{1}{,}994049292, \quad \log \beta_1 = \bar{1}{,}998343862,$$

$x = t + 20$, t étant la température en degrés centigrades, comptée à partir de la glace fondante.

C'est en faisant usage de ces formules qu'on a calculé, dans la limite relative à chacune d'elles, les valeurs de H de la 3° colonne de la table suivante, valeurs que nous avons exprimées en mètres. On pouvait calculer cette colonne dans toute son étendue avec la formule unique (*c*); on aurait obtenu des valeurs pour ainsi dire identiques à celles qui ont été calculées avec la formule (*b*) entre 40° et 100°; mais dans les températures plus basses les forces élastiques données par la formule (*c*) seraient un peu trop faibles.

Regnault a donné la pression H en hauteur du mercure pour les températures variant de degré en degré; nous avons intercalé les valeurs de H dont on fait le plus habituellement usage dans la pratique, et déterminé les températures correspondantes à ces pressions, en admettant que d'un degré à un autre l'augmentation de la température est proportionnelle à l'augmentation de H, ce qui ne peut s'écarter sensiblement de la vérité.

Nous donnons dans la colonne 2 de la table suivante la pression N de la vapeur en atmosphères, que nous avons calculée à l'aide de la formule $N = \frac{H}{0{,}76}$, et dans la colonne 4 la pression $h = H \times 13{,}59593$ en hauteur d'eau.

En divisant par 10 la pression h en mètres de hauteur d'eau, on a la *pression* P *en kilogrammes par centimètre carré.* Ainsi, par exemple, à 5,25 atmosphères, la pression par centimètre carré est de $5^k{,}4248$.

On admet ordinairement $\frac{5}{8} = 0{,}625$ pour le rapport de la densité de la vapeur d'eau à celle de l'air à la même température et à la même pression.

Comme à l'eudiomètre, un volume d'oxygène et deux volumes d'hydrogène se condensent exactement en 2 volumes de vapeur d'eau,

1 mètre cube d'oxygène à 0° pesant (465).	$1^k{,}429802$
et 2 mètres cubes d'hydrogène	0 ,179156
Total	$1^k{,}608958$

un mètre cube de vapeur d'eau pèse donc $\frac{1{,}608958}{2} = 0{,}804479$.

Un mètre cube d'air à 0° pesant $1^k{,}293187$, le rapport de la densité de la vapeur d'eau à celle de l'air est $\frac{0{,}804479}{1{,}293187} = 0{,}622$.

Regnault a reconnu, pour les températures supérieures à 100°, qu'à partir de 130° ce rapport reste sensiblement constant et égal à 0,622. A 100° Watt avait trouvé 0,6334 et Gay-Lussac 0,6235.

Nous admettrons le rapport 0,622 pour calculer la table suivante, quelle que soit la température, quoique des physiciens ont donné des valeurs dont quelques-unes diffèrent sensiblement de 0,622.

Le poids Q d'un mètre cube d'air à la pression H de mercure et à la température $t°$ est (483 et 484) :

$$Q = \frac{1{,}293\,187\,H}{0{,}76\,(1 + 0{,}003\,67\,t)}. \qquad (A)$$

A la même pression et à la même température, le poids q d'un mètre cube de vapeur et le volume V d'un kilog. de vapeur sont :

$$q = 0{,}622\,Q = \frac{0{,}622 \times 1{,}293\,187\,H}{0{,}76\,(1 + 0{,}003\,67\,t)},$$

$$V = \frac{1}{q} = \frac{0{,}76\,(1 + 0{,}003\,67\,t)}{0{,}622 \times 1{,}293\,187\,H}.$$

C'est à l'aide de ces formules que nous avons calculé les trois dernières colonnes de la table suivante.

Effectuant les calculs, on a sensiblement :

$$q = \frac{1{,}06\,H}{1 + 0{,}003\,67\,t} \quad \text{et} \quad V = \frac{1 + 8{,}003\,67\,t}{1{,}06\,H}.$$

Le volume d'un kilog. d'eau à la température de 4° étant de $0^{mc},001$, le rapport du volume de la vapeur à celui de l'eau à 4° qui l'a produite est $\frac{V}{0{,}001} = 1\,000\,V$. Ainsi on aura les valeurs de ce rapport en multipliant par 1 000 les volumes V consignés dans la 6e colonne du tableau suivant. Pour la vapeur à 100°, c'est-à-dire à la pression d'une atmosphère, par exemple, ce rapport est 1 699,5, soit 1 700; ce qui montre que sous la pression atmosphérique $0^{m},76$, un kilog. ou un litre d'eau produit sensiblement 1 700 litres de vapeur.

En divisant par 1 000 le poids q d'un mètre cube de vapeur, on a le poids d'un décimètre cube ou la densité de cette vapeur.

Table des forces élastiques de la vapeur d'eau à différentes températures, d'après les expériences de Regnault, du poids* q *d'un mètre cube de vapeur et du volume* V *d'un kilogramme de vapeur.

TEMPÉRATURE t	FORCE ÉLASTIQUE DE LA VAPEUR en atmosphères N	en hauteur de mercure H	en hauteur d'eau $h = 10$ P	VAPEUR. Poids d'un m. cube q	Volume d'un kilog. V	AIR. Poids d'un m. cube Q
	atm.	mèt.	mèt.	kilog.	m. c.	kilog.
− 32°	0,000408	0,000310	0,004215	0,00037175	2690,0	0,00059768
31	0,000442	0,000336	0,004568	0,00040127	2492,1	0,00064542
30	0,000480	0,000365	0,004963	0,00043410	2303,6	0,00069791
29	0,000522	0,000397	0,005398	0,00047022	2126,7	0,00075598
28	0,000567	0,000431	0,005860	0,00052024	1922,2	0,00084737
27	0,000616	0,000468	0,006363	0,00054980	1818,9	0,00088392
26	0,000670	0,000509	0,006920	0,00059554	1679,2	0,00095745
25	0,000728	0,000553	0,007519	0,00065941	1516,5	0,0010360
24	0,000792	0,000602	0,008185	0,00069868	1431,3	0,0011233
23	0,000861	0,000654	0,008892	0,00075599	1322,8	0,0012154
22	0,000936	0,000711	0,009667	0,00081859	1221,6	0,0013164
21	0,001018	0,000774	0,010523	0,00088759	1126,7	0,0014270
20	0,001107	0,000841	0,011434	0,00096060	1041,02	0,0015444
19	0,001205	0,000916	0,012454	0,0010421	959,57	0,0016755
18	0,001313	0,000998	0,013569	0,0011310	884,20	0,0018183
17	0,001426	0,001084	0,014738	0,0012236	817,25	0,0019674
16	0,001551	0,001179	0,016030	0,0013257	754,34	0,0021313
15	0,001690	0,001284	0,017457	0,0014381	695,35	0,0023121
14	0,001839	0,001398	0,019007	0,0015798	641,43	0,0025076
13	0,002001	0,001521	0,020679	0,0016905	591,56	0,0027177
12	0,002179	0,001656	0,022515	0,0018334	545,43	0,0029476
11	0,002372	0,001803	0,024544	0,0019885	502,89	0,0031970
10	0,002583	0,001963	0,026689	0,0021567	463,67	0,0034674
9	0,002812	0,002137	0,029055	0,0023390	427,53	0,0037604
8	0,003062	0,002327	0,031638	0,0025373	394,12	0,0040793
7	0,003333	0,002533	0,034439	0,0027516	363,43	0,0044237
6	0,003629	0,002758	0,037498	0,0029847	335,04	0,0047986
5	0,003953	0,003004	0,040842	0,0032388	308,76	0,0052071
4	0,004304	0,003271	0,044472	0,0035135	284,62	0,0056487
3	0,004795	0,003644	0,049543	0,0038896	256,43	0,0062695
2	0,005404	0,003879	0,052739	0,0041358	241,79	0,0066492
1	0,005558	0,004224	0,057429	0,0044870	222,86	0,0072139
0	1/166 = 0,0061	0,004600	0,062541	0,0048685	205,40	0,0078272
+ 1	0,0065	0,004940	0,067164	0,0052092	191,97	0,0083750
2	0,0070	0,005302	0,072086	0,0055706	179,51	0,0089559
3	0,0075	0,005687	0,077320	0,0059534	167,97	0,0095714
4	0,0080	0,006097	0,082894	0,0063595	157,24	0,0102243
5	0,0086	0,006534	0,088836	0,0067908	147,26	0,010918
6	0,0092	0,006998	0,095144	0,0072469	137,99	0,011654
7	0,0099	0,007492	0,101862	0,0077325	129,32	0,012432
8	0,0105	0,008017	0,10900	0,0082430	121,32	0,013252
9	0,0113	0,008574	0,11657	0,0087843	113,84	0,014123
10	0,0121	0,009165	0,12461	0,0093566	106,88	0,015043
11	0,0129	0,009792	0,13316	0,0099614	100,387	0,016015
12	0,0138	0,010457	0,14217	0,0106005	94,335	0,017043
13	0,0147	0,011162	0,15176	0,011276	88,687	0,018128
14	0,0157	0,011908	0,16190	0,011987	83,422	0,019272
15	0,0167	0,012699	0,17265	0,012739	78,499	0,020481
16	0,0178	0,013536	0,18403	0,013531	73,901	0,021755
17	0,0190	0,014421	0,19607	0,014367	69,607	0,023097
17,83	1/50 = 0,02	0,015200	0,20666	0,015099	66,229	0,024275
18	0,0202	0,015357	0,20879	0,015246	65,590	0,024512

TEMPÉRATURE	FORCE ÉLASTIQUE DE LA VAPEUR			VAPEUR.		AIR.
t	en atmosphères p	en hauteur de mercure H	en hauteur d'eau h	Poids d'un m. cube q	Volume d'un kilog. V	Poids d'un m. cube Q
	atm.	mèt.	mèt.	kilog.	m. c.	kilog.
19°	0,0215	0,016346	0,22224	0,016172	61,834	0,026001
20	0,0229	0,017391	0,23645	0,017148	58,317	0,027568
21	0,0243	0,018495	0,25146	0,018191	54,973	0,029246
22	0,0259	0,019659	0,26728	0,019252	51,942	0,030952
23	0,0275	0,020888	0,28399	0,020386	49,052	0,032776
24	0,0292	0,022184	0,30161	0,021578	46,343	0,034692
25	0,0310	0,023550	0,32018	0,022830	43,802	0,036704
26	0,0329	0,024988	0,33974	0,024143	41,420	0,038816
27	0,0349	0,026505	0,36036	0,025524	39,180	0,041034
28	0,0370	0,028101	0,38206	0,026970	37,078	0,043360
29	0,0392	0,029782	0,40491	0,028488	35,102	0,045801
29,35	1/25 = 0,04	0,030400	0,41332	0,029046	34,428	0,046697
30	0,0415	0,031548	0,42893	0,030078	33,247	0,048357
31	0,0440	0,033406	0,45419	0,031744	31,502	0,051036
32	0,0465	0,035359	0,48073	0,033490	29,860	0,053842
33	0,0492	0,037411	0,50863	0,035317	28,315	0,056780
33,27	1/20 = 0,05	0,038000	0,51665	0,035842	27,900	0,057623
34	0,0521	0,039565	0,53792	0,037229	26,861	0,059854
35	0,0551	0,041827	0,56949	0,039286	25,454	0,063160
36	0,0582	0,044201	0,60096	0,041322	24,200	0,066433
37	0,0614	0,046691	0,63481	0,043508	22,984	0,069949
38	0,0649	0,049302	0,67031	0,045793	21,837	0,073623
38,50	1/15 = 0,0667	0,050667	0,68887	0,046986	21,283	0,075540
39	0,0685	0,052039	0,70752	0,048181	20,755	0,077464
40	0,0722	0,054906	0,74650	0,050672	19,735	0,081467
41	0,0762	0,057910	0,78734	0,053274	18,771	0,085650
42	0,0803	0,061055	0,83010	0,055989	17,861	0,090014
42,69	1/12 = 0,0833	0,063333	0,86107	0,057951	17,256	0,093168
43	0,0847	0,064346	0,87484	0,058820	17,001	0,094565
44	0,0892	0,067790	0,92167	0,061772	16,189	0,099342
45	0,0939	0,071394	0,97063	0,064848	15,421	0,104258
46	0,0989	0,075158	1,02183	0,068056	14,694	0,10941
46,21	1/10 = 0,10	0,076000	1,03329	0,068773	14,541	0,11057
47	0,1041	0,079093	1,07534	0,071395	14,007	0,11478
48	0,1095	0,083204	1,1312	0,074871	13,356	0,12037
49	0,1151	0,087499	1,1896	0,078491	12,740	0,12619
50	0,1210	0,091982	1,2506	0,082257	12,157	0,13224
50,63	1/8 = 0,125	0,095000	1,2916	0,084790	11,794	0,13632
51	0,1272	0,096661	1,3142	0,086173	11,604	0,13844
52	0,1336	0,101543	1,3806	0,090247	11,081	0,14509
53	0,1403	0,106636	1,4498	0,094483	10,584	0,15190
53,36	1/7 = 0.1429	0,108571	1,4761	0,096120	10,404	0,15453
54	0,1473	0,111945	1,5220	0,098883	10,113	0,15898
55	0,1546	0,117478	1,5970	0,103453	9,6662	0,16632
56	0,1622	0,123244	1,6756	0,10820	9,2421	0,17396
56,57	1/6 = 0,1667	0,126667	1,7222	0,11102	9,0078	0,17848
57	0,1701	0,129251	1,7573	0,11313	8,8394	0,18188
58	0,1783	0,135505	1,8423	0,11824	8,4570	0,19011
59	0,1869	0,142015	1,9308	0,12355	8,0938	0,19864
60	0,1958	0,148791	2,0229	0,12907	7,7478	0.20751
60,46	1/5 = 0,20	0,152000	2,0666	0,13166	7,5954	0,21167
61	0,2051	0,155839	2,1188	0,13477	7,4203	0,21667
62	0,2147	0,163170	2,2194	0,14068	7,1082	0,22618
63	0,2247	0,170791	2,3221	0,14682	6,8113	0,23604
64	0,2352	0,178714	2,4298	0,15317	6,5287	0,24626
65	0,2460	0,186945	2,5417	0,15975	6,2598	0,25683
65,36	1/4 = 0,25	0,190000	2,5832	0,16249	6,1657	0,26075

TEMPÉRATURE t	FORCE ÉLASTIQUE DE LA VAPEUR en atmosphères N	en hauteur de mercure H	en hauteur d'eau $h=10P$	VAPEUR. Poids d'un m. cube q	Volume d'un kilog. V	AIR. Poids d'un m. cube Q
	atm.	mèt.	mèt.	kilog.	m. c.	kilog.
66°	0,2572	0,195496	2,6579	0,16656	6,0038	0,26779
67	0,2689	0,204376	2,7787	0,17362	5,7599	0,27942
68	0,2810	0,213596	2,9040	0,18092	5,5275	0,29086
69	0,2936	0,223165	3,0341	0,18847	5,3060	0,30300
69,49	3/10 = 0,30	0,228000	3,0999	0,19227	5,2009	0,30942
70	0,3067	0,233093	3,1691	0,19628	5,0949	0,31556
71	0,3203	0,243393	3,3092	0,20435	4,8935	0,32854
72	0,3343	0,254073	3,4544	0,21270	4,7015	0,34196
73	0,3489	0,265147	3,6049	0,22133	4,5182	0,35583
74	0,3640	0,276624	3,7610	0,23024	4,3433	0,37016
75	0,3796	0,288517	3,9227	0,23945	4,1762	0,38497
76	0,3958	0,300838	4,0902	0,24896	4,0167	0,40025
76,25	4/10 = 0,40	0,304000	4,1332	0,25139	3,9778	0,40417
77	0,4126	0,313600	4,2637	0,25878	3,8643	0,41604
78	0,4300	0,326811	4,4433	0,26891	3,7187	0,43233
79	0,4480	0,340488	4,6293	0,27937	3,5795	0,44914
80	0,4666	0,354643	4,8217	0,29015	3,4464	0,46649
81	0,4859	0,369287	5,0208	0,30128	3,3192	0,48438
81,71	1/2 = 0,50	0,380000	5,1665	0,30940	3,2321	0,49743
82	0,5058	0,384435	5,2268	0,31275	3,1974	0,50282
83	0,5265	0,400101	5,4397	0,32458	3,0809	0,52184
84	0,5478	0,416298	5,6600	0,33678	2,9693	0,54144
85	0,5698	0,433041	5,8876	0,34934	2,8625	0,56164
86	0,5926	0,450344	6,1228	0,36229	2,7603	0,58245
86,32	6/10 = 0,60	0,455000	6,1861	0,36651	2,7284	0,58924
87	0,6161	0,468221	6,3659	0,37562	2,6623	0,60389
88	0,6404	0,486687	6,6169	0,38935	2,5684	0,62597
89	0,6655	0,505759	6,8763	0,40349	2,4784	0,64870
90	0,6914	0,525450	7,1440	0,41804	2,3921	0,67209
90,32	7/10 = 0,70	0,532000	7,2330	0,42288	2,3647	0,67987
91	0,7181	0,545778	7,4204	0,43302	2,3094	0,69617
92	0,7457	0,566757	7,7056	0,44843	2,2300	0,72095
92,15	3/4 = 0,75	0,570000	7,7497	0,45081	2,2182	0,72478
93	0,7742	0,588406	7,9999	0,46429	2,1638	0,74644
93,88	8/10 = 0,80	0,608000	8,2663	0,47859	2,0894	0,76944
94	0,8036	0,610740	8,2845	0,48059	2,0808	0,77266
95	0,8339	0,633778	8,6168	0,49737	2,0106	0,79962
96	0,8652	0,657535	8,9398	0,51461	1,9432	0,82735
97	0,8974	0,682029	9,2728	0,53233	1,8785	0,85584
97,08	9/10 = 0,90	0,684000	9,2996	0,53376	1,8735	0,85813
98	0,9306	0,707280	9,6162	0,55055	1,8164	0,88513
99	0,9649	0,733305	9,9700	0,56927	1,7566	0,91523
100	1 = 1,00	0,76000	10,3329	0,58841	1,6995	0,94600
101	1,0363	0,78759	10,7080	0,60814	1,6444	0,97772
102	1,0737	0,81601	11,095	0,62840	1,5913	1,01030
103	1,1122	0,84528	11,492	0,64921	1,5403	1,04376
104	1,1518	0,87541	11,902	0,67057	1,4913	1,07808
105	1,1926	0,90644	12,323	0,69247	1,4441	1,1133
106	1,2346	0,93831	12,757	0,71495	1,3987	1,1494
106,36	1 1/4 = 1,25	0,95000	12,916	0,72317	1,3828	1,1627
107	1,2778	0,97114	13,204	0,73802	1,3550	1,1865
108	1,3222	1,00491	13,663	0,76167	1,3129	1,2246
109	1,3680	1,03965	14,138	0,78594	1,2724	1,2636
110	1,4150	1,07537	14,621	0,81082	1,2333	1,3036
111	1,4636	1,11209	15,120	0,83631	1,1957	1,3446
111,74	1 1/2 = 1,50	1,14000	15,499	0,85565	1,1687	1,3757
112	1,5129	1,14983	15,633	0,86245	1,1595	1,3806

TEMPÉRATURE	FORCE ÉLASTIQUE DE LA VAPEUR			VAPEUR.		AIR.
	en atmosphères	en hauteur de mercure	en hauteur d'eau	Poids d'un m. cube	Volume d'un kilog.	Poids d'un m. cube
t	N	H	$h = 10P$	q	V	Q
	atm.	mèt.	mèt.	kilog.	m. cub.	kilog.
113°	1,5640	1,18861	16,160	0,88922	1,1246	1,4296
114	1,6164	1,22847	16,702	0,91666	1,0909	1,4737
115	1,6703	1,26941	17,259	0,94477	1,0585	1,5189
116	1,7256	1,31147	17,831	0,97356	1,02716	1,5652
116,43	1 3/4 = 1,75	1,33000	18,083	0,98622	1,01397	1,5856
117	1,7824	1,35466	18,418	1,00304	0,99697	1,6126
118	1,8408	1,39902	19,021	1,03323	0,96784	1,6614
119	1,9007	1,44455	19,640	1,06413	0,93973	1,7108
120	1,9622	1,49128	20,275	1,0958	0,91261	1,7617
120,60	2 = 2,00	1,52000	20,666	1,1151	0,89674	1,7929
121	2,0253	1,53925	20,928	1,1281	0,88642	1,8137
122	2,0901	1,58847	21,597	1,1613	0,86114	1,8670
123	2,1565	1,63896	22,283	1,1951	0,83673	1,9214
124	2,2247	1,69076	22,987	1,2298	0,81314	1,9772
124,36	2,25	1,71000	23,249	1,2427	0,80472	1,9978
125	2,2946	1,74388	23,710	1,2652	0,79036	2,0342
126	2,3663	1,79835	24,450	1,3012	0,76853	2,0919
127	2,4397	1,85420	25,210	1,3385	0,74708	2,1520
127,80	2,50	1,90000	25,832	1,3689	0,73053	2,2008
128	2,5151	1,91147	25,988	1,3765	0,72651	2,2129
129	2,5923	1,97015	26,786	1,4152	0,70663	2,2752
130	2,6714	2,03028	27,604	1,4547	0,68741	2,3388
130,97	2,75	2,09000	28,415	1,4939	0,66938	2,4048
131	2,7525	2,09194	28,442	1,4952	0,66881	2,4039
132	2,8356	2,15503	29,300	1,5365	0,65084	2,4702
133	2,9206	2,21969	30,179	1,5787	0,63344	2,5381
133,94	3,00	2,28000	30,999	1,6179	0,61807	2,6012
134	3,0078	2,28592	31,079	1,6218	0,61660	2,6074
135	3,0970	2,35373	32,001	1,6658	0,60031	2,6781
136	3,1884	2,42316	32,945	1,7107	0,58454	2,7504
136,66	3,25	2,47000	33,582	1,7410	0,57438	2,7990
137	3,2819	2,49423	33,911	1,7566	0,56928	2,8241
138	3,3776	2,56700	34,901	1,8035	0,55449	2,8995
139	3,4753	2,64144	35,913	1,8555	0,53893	2,9831
139,25	3,50	2,66000	36,165	1,8631	0,53673	2,9954
140	3,5758	2,71763	36,949	1,9044	0,52510	3,0617
141	3,6784	2,79557	38,008	1,9498	0,51288	3,1347
141,68	3,75	2,85000	38,748	1,9845	0,50391	3,1905
142	3,7833	2,87530	39,092	2,0006	0,49986	3,2163
143	3,8904	2,95686	40,201	2,0524	0,48724	3,2996
144	4,0003	3,04026	41,335	2,1052	0,47502	3,3845
145	4,1126	3,12555	42,495	2,1591	0,46317	3,4712
146	4,2273	3,21274	43,680	2,2140	0,45168	3,5595
146,49	4,25	3,23000	43,915	2,2249	0,44947	3,5770
147	4,3446	3,30187	44,892	2,2700	0,44053	3,6495
148	4,4644	3,39298	46,131	2,3271	0,42973	3,7413
148,29	4,50	3,42000	46,498	2,3440	0,42662	3,7685
149	4,5870	3,48609	47,396	2,3852	0,41924	3,8348
150	4,7121	3,58123	48,690	2,4446	0,40908	3,9301
150,30	4,75	3,61000	49,081	2,4624	0,40610	3,9589
151	4,8400	3,67843	50,012	2,5050	0,39921	4,0273
152	4,9707	3,77774	51,362	2,5665	0,38963	4,1263
152,22	5,00	3,80000	51,665	2,5803	0,38755	4,1484
153	5,1042	3,87918	52,741	2,6293	0,38034	4,2271
154	5,2405	3,98277	54,150	2,6931	0,37131	4,3298
154,07	5,25	3,99000	54,248	2,6976	0,37070	4,3370
155	5,3797	4,08856	55,588	2,7582	0,36256	4,4344

TEMPÉRATURE t	FORCE ÉLASTIQUE DE LA VAPEUR en atmosphères. N	en hauteur de mercure H	en hauteur d'eau $h = 10$ P	VAPEUR. Poids d'un m. cube ϖ	Volume d'un kilog. V	AIR. Poids d'un m. cube Q
°	atm.	mèt.	mèt.	kilog.	m. c.	kilog.
155,85	5,5	4,18000	56,831	2,8143	0,35533	4,5246
156	5,5218	4,19659	57,057	2,8245	0,35405	4,5410
157	5,6669	4,30688	58,556	2,8920	0,34579	4,6495
157,56	5,75	4,37000	59,414	2,9305	0,34124	4,7144
158	5,8151	4,41945	60,086	2,9606	0,33776	4,7599
159	5,9663	4,53436	61,649	3,0306	0,32997	4,8723
159,22	6,00	4,56000	61,997	3,0462	0,32828	4,8974
160	6,1206	4,65162	63,243	3,1018	0,32240	4,9863
161	6,2780	4,77128	64,870	3,1742	0,31504	5,1033
162	6,4386	4,89336	66,530	3,2479	0,30789	5,2218
162,37	6,50	4,94000	67,164	3,2761	0,30524	5,2674
163	6,6025	5,01794	68,223	3,3230	0,30094	5,3424
164	6,7697	5,14497	69,951	3,3993	0,29418	5,4654
165	6,9402	5,27454	71,712	3,4770	0,28761	5,5900
165,34	7	5,32000	72,330	3,5042	0,28537	5,6338
166	7,1144	5,40669	73,509	3,5559	0,28122	5,7169
167	7,2913	5,54143	75,341	3,6363	0,27501	5,8461
168	7,4721	5,67882	77,209	3,7171	0,26903	5,9760
168,15	7,5	5,70000	77,497	3,7306	0,26806	5,9977
169	7,6564	5,81890	79,113	3,8011	0,26309	6,1110
170	7,8443	5,96166	81,054	3,8855	0,25737	6,2468
170,84	8	6,08000	82,663	3,9554	0,25282	6,3591
171	8,0358	6,10719	83,033	3,9714	0,25180	6,3848
172	8,2309	6,25548	85,049	4,0586	0,24639	6,5252
173	8,4297	6,40660	87,104	4,1474	0,24112	6,6678
173,35	8,5	6,46000	87,830	4,1786	0,23931	6,7181
174	8,6323	6,56055	89,197	4,2375	0,23599	6,8127
175	8,8387	6,71743	91,330	4,3292	0,23099	6,9600
175,77	9	6,84000	92,996	4,4006	0,22724	7,0749
176	9,0490	6,87722	93,502	4,4222	0,22613	7,1097
177	9,2631	7,03997	95,715	4,5168	0,22140	7,2618
178	9,4812	7,20572	97,968	4,6129	0,21678	7,4162
178,08	9,5	7,22000	98,163	4,6212	0,21639	7,4296
179	9,7033	7,37452	100,263	4,7105	0,21229	7,5731
180	9,9295	7,54639	102,600	4,8096	0,20790	7,7325
180,34	10	7,60000	103,329	4,8405	0,20659	7,7824
181	10,1597	7,72137	104,980	4,9103	0,20365	7,8944
182	10,3941	7,89952	107,402	5,0125	0,19950	8,0588
183	10,6327	8,08084	109,87	5,1163	0,19545	8,2256
184	10,8755	8,26540	112,37	5,2217	0,19151	8,3951
184,50	11	8,36000	113,66	5,2757	0,18955	8,4819
185	11,1226	8,45323	114,93	5,3287	0,18766	8,5671
186	11,3741	8,64435	117,53	5,4373	0,18391	8,7417
187	11,6300	8,83882	120,17	5,5475	0,18026	8,9189
188	11,8903	9,03668	122,86	5,6594	0,17670	9,0987
188,44	12	9,12000	123,99	5,7065	0,17523	9,1744
189	12,1542	9,23725	125,59	5,7725	0,17324	9,2805
190	12,4246	9,44270	128,38	5,8881	0,16983	9,4664
191	12,6986	9,65093	131,22	6,0050	0,16653	9,6543
192	12,9772	9,86271	134,09	6,1235	0,16334	9,8449
192,08	13	9,88000	134,33	6,1332	0,16305	9,8605
193	13,2605	10,07804	137,02	6,2438	0,16016	10,0382
194	13,5487	10,29701	140,00	6,3658	0,15709	10,2344
195	13,8446	10,51963	143,02	6,4895	0,15410	10,4332
195,53	14	10,64000	144,66	6,5563	0,15253	10,5407
196	14,1394	10,74595	146,10	6,6149	0,15117	10,6349
197	14,4408	10,97500	149,22	6,7445	0,14834	10,8390

TEMPÉRATURE t	FORCE ÉLASTIQUE DE LA VAPEUR en atmosphères N	en hauteur de mercure H	en hauteur d'eau $h=10P$	VAPEUR. Poids d'un m. cube q	Volume d'un kil. V	AIR. Poids d'un m. cube Q
	atm.	mèt.	mèt.	kilog.	m. c.	kilog.
198°	14,7498	11,20982	152,41	6,8712	0,14554	11,047
198,80	15	11,40000	154,89	6,9759	0,14335	11,215
199	15,0625	11,44746	155,64	7,0020	0,14282	11,257
200	15,3802	11,68896	158,92	7,1345	0,14016	11,470
201	15,7031	11,93437	162,26	7,2689	0,13757	11,686
201,90	16	12,16000	165,33	7,3923	0,13528	11,885
202	16,0312	12,18369	165,65	7,4051	0,13504	11,905
203	16,3645	12,43700	169,09	7,5432	0,13257	12,127
204	16,7030	12 69430	172,59	7,6831	0,13016	12,352
204,86	17	12,92000	175,66	7,8056	0,12811	12,549
205	17,0469	12,95566	176,14	7,8249	0,12780	12,580
206	17,3962	13,22112	179,75	7,9685	0,12549	12,811
207	17,7510	13,49075	183,42	8,1141	0,12353	13,045
207,69	18	13,68000	185,99	8,2161	0,12171	13,209
208	18,1112	13,76453	187,14	8,2615	0,12104	13,282
209	18,4770	14,04252	190,92	8,4108	0,11889	13,522
210	18,8484	14,32480	194,76	8,5621	0,11679	13,766
210,40	19	14,44000	196,33	8,6238	0,11596	13,865
211	19,2254	14,61132	198,65	8,7158	0,11473	14,013
212	19,6081	14,90222	202,61	8,8705	0,11273	14,261
213	19,9967	15,19748	206,62	9,0276	0,11077	14,514
213,01	20	15,20000	206,66	9,0289	0,11075	14,516
214	20,3910	15,49717	210,70	9,1867	0,10885	14,769
215	20,7912	15,80133	214,83	9,3478	0,106977	15,029
215,51	21	15,96000	216,99	9,4318	0,106024	15,164
216	21,1973	16,10994	219,03	9,5109	0,105143	15,291
217	21,6094	16,42315	223,29	9,6760	0,103349	15,556
217,93	22	16,72000	227,32	9,8322	0,101707	15,807
218	22,0275	16,74090	227,61	9,8431	0,101594	15,825
219	22,4517	17,06329	231,99	10,0122	0,099878	16,097
220	22,8821	17,39036	236,44	10,1834	0,098199	16,372
220,27	23	17,48000	237,66	10,2303	0,097749	16,447
221	23,3186	17,72213	240,95	10,3566	0,096556	16,651
222	23,7614	18,05864	245,52	10,5319	0,094949	16,932
222,53	24	18,24000	247,99	10,6263	0,094106	17,084
223	24,2104	18,39994	250,16	10,7093	0,093376	17,218
224	24,6659	18,74607	254,87	10,8888	0,091837	17,506
224,72	25	19,00000	258,32	11,0203	0,090741	17,718
225	25,1277	19,09704	259,64	11,0704	0,090331	17,798
226	25,5960	19,45292	264,48	11,2541	0,088857	18,093
226,85	26	19,76000	268,66	11,4123	0,087625	18,348
227	26,0707	19,81376	269,39	11,4398	0,087413	18,392
228	26,5521	20,17961	274,36	11,6278	0,086001	18,694
228,92	27	20,52000	278,99	11,7996	0,084749	18,970
229	27,0401	20,55048	279,40	11,8179	0,084617	19,000
230	27,5347	20,92640	284,51	12,0102	0,083263	19,309

Dans les décrets des 25 janvier 1865 et 1[er] mai 1880, relatifs aux chaudières à vapeur (voir plus loin : CHAUDIÈRES), la pression de la vapeur étant exprimée en kilogrammes par centimètre carré, pour répondre aux besoins actuels, au tableau précédent nous joignons le suivant, dans lequel les mêmes lettres ont les mêmes significations.

p pression effective de la vapeur en kilogrammes par centimètre carré; c'est la différence des pressions à l'intérieur et à l'extérieur de la chaudière; p est le numéro du timbre d'après les décrets des 25 janvier 1865 et du 1[er] mai 1880;

$P = p + 1{,}033\,29$ pression absolue de la valeur en kilogrammes par centimètre carré;

$h_1 = 10p$ et $H_1 = \frac{h_1}{13{,}595\,93}$ pression effective de la vapeur respectivement en mètres de hauteur d'eau et en mètres de hauteur de mercure;

$N = \frac{p}{1{,}033\,29} + 1$ force élastique ou pression absolue de la vapeur en atmosphères;

1,033 29 pression d'une atmosphère en kilogrammes sur un centimètre carré;

Les valeurs de q, V et Q sont calculées à l'aide des formules de la page 645, en y faisant $H = H_1 + 0{,}76$;

q_1 est le poids d'un mètre cube de vapeur d'eau déduit de l'application de la théorie mécanique de la chaleur aux résultats des expériences précédentes de Regnault (*Théorie mécanique de la chaleur*, par M. Zeuner).

TEMPÉRATURE t	FORCE élastique N	PRESSION EFFECTIVE		VAPEUR.			AIR. — Poids d'un mètre cube Q
		H_1	$p = \frac{h_1}{10}$	Poids d'un mètre cube q	Poids d'un mètre cube q_1	Volume d'un kil. V	
degrés	atm.	mèt.	kil.	kil.	kil.	mèt. cubes	kil.
67,44	0,2742	—0,551 635	— 0,75	0,1768	0,1785	5,6570	0,2842
82,50	0,5161	—0,367 757	— 0,50	0,3187	0,3248	3,1382	0,5123
92,44	0,7581	—0,183 878	— 0,25	0,4553	0,4667	2,1964	0,7320
100,00	1,0000	0,000 000	0,00	0,5884	0,6059	1,6995	0,9460
106,17	1,2419	0,183 878	0,25	0,7189	0,7420	1,3911	1,1557
111,41	1,4839	0,367 757	0,50	0,8472	0,8784	1,1804	1,3621
116,00	1,7258	0,551 635	0,75	0,9737	1,0125	1,02703	1,5654
120,09	1,9678	0,735 514	1,00	1,0986	1,1455	0,91024	1,7663
123,78	2,2097	0,919 392	1,25	1,2222	1,2774	0,81819	1,9650
127,16	2,4517	1,103 27	1,50	1,3446	1,4032	0,74374	2,1617
130,27	2,6936	1,287 15	1,75	1,4659	1,5386	0,68220	2,3567
133,17	2,9356	1,471 03	2,00	1,5861	1,6680	0,63049	2,5500
135,88	3,1775	1,654 91	2,25	1,7055	1,7968	0,58637	2,7418
138,43	3,4195	1,838 78	2,50	1,8239	1,9250	0,54829	2,9323
140,83	3,6614	2,022 66	2,75	1,9416	2,0526	0,51505	3,1245
143,12	3,9033	2,206 54	3,00	2,0585	2,1797	0,48580	3,3095
145,29	4,1453	2,390 42	3,25	2,1748	2,3063	0,45983	3,4964
147,35	4,3872	2,574 30	3,50	2,2904	2,4324	0,43662	3,6823
149,34	4,6292	2,758 18	3,75	2,4053	2,5582	0,41576	3,8670
151,24	4,8711	2,942 06	4,00	2,5197	2,6835	0,39689	4,0509
153,07	5,1131	3,125 93	4,25	2,6334	2,8083	0,37974	4,2338
154,82	5,3550	3,309 81	4,50	2,7467	2,9329	0,36407	4,4160
156,52	5,5970	3,493 69	4,75	2,8595	3,0571	0,34972	4,5972
158,16	5,8389	3,677 57	5,00	2,9717	3,1809	0,33651	4,7777
159,74	6,0809	3,861 45	5,25	3,0835	3,3045	0,32431	4,9574
161,28	6,3228	4,045 33	5,50	3,1948	3,4277	0,31301	5,1364
162,77	6,5647	4,229 20	5,75	3,3057	3,5506	0,30251	5,3142
164,22	6,8067	4,413 08	6,00	3,4162	3,6733	0,29273	5,4922
165,62	7,0486	4,596 96	6,25	3,5263	3,7956	0,28359	5,6693
167,00	7,2906	4,780 84	6,50	3,6359	3,9178	0,27504	5,8455
168,33	7,5325	4,964 72	6,75	3,7452	4,0397	0,26701	6,0212
169,63	7,7745	5,148 60	7,00	3,8542	4,1613	0,25946	6,1964
170,90	8,0164	5,332 48	7,25	3,9627	4,2827	0,25236	6,3709
172,14	8,2584	5,516 35	7,50	4,0709	4,4039	0,24565	6,5449
173,35	8,5003	5,700 23	7,75	4,1788	4,5249	0,23931	6,7183

TEMPÉRATURE t	FORCE élastique N	PRESSION EFFECTIVE		VAPEUR.			AIR.
		H_1	$p = \frac{h_1}{10}$	Poids d'un mètre cube		Volume d'un kil. V	Poids d'un mètre cube Q
				q	q_1		
degrés	atm.	mèt.	kil.	kil.	kil.	mèt. cubes	kil.
174,53	8,7423	5,88411	8,00	4,2864	4,6457	0,23330	6,8914
175,69	8,9842	6,06799	8,25	4,3936	4,7662	0,22761	7,0637
176,83	9,2262	6,25187	8,50	4,5005	4,8866	0,22220	7,2355
177,94	9,4681	6,43575	8,75	4,6072	5,0068	0,21705	7,4071
179,03	9,7100	6,61962	9,00	4,7135	5,1268	0,21216	7,5779
180,10	9,9520	6,80350	9,25	4,8195	5,2466	0,20750	7,7484
181,15	10,1939	6,98738	9,50	4,9253	5,3713	0,20304	7,9184
182,18	10,4359	7,17126	9,75	5,0307	5,4858	0,19878	8,0880
183,19	10,6778	7,35514	10,00	5,1359	5,6050	0,19471	8,2571
184,18	10,9198	7,53902	10,25	5,2409	5,7241	0,19081	8,4259
185,16	11,1617	7,72290	10,50	5,3456	5,8430	0,18708	8,5942
186,12	11,4037	7,90677	10,75	5,4500	5,9619	0,18349	8,7621
187,06	11,6456	8,09065	11,00	5,5543	6,0807	0,18005	8,9296
187,99	11,8876	8,27453	11,25	5,6582	6,1992	0,17674	9,0968
188,91	12,1295	8,45841	11,50	5,7619	6,3176	0,17356	9,2634
189,80	12,3714	8,64229	11,75	5,8655	6,4357	0,17049	9,4300
190,69	12,6134	8,82617	12,00	5,9687	6,5539	0,16755	9,5960
192,42	13,0973	9,19392	12,50	6,1746	6,7898	0,16196	9,9270
194,11	13,5812	9,56168	13,00	6,3795	7,0252	0,15675	10,2565
195,75	14,0651	9,92944	13,50	6,5837	7,2598	0,15189	10,5847
197,35	14,5490	10,29719	14,00	6,7870		0,14734	10,912
198,90	15,0328	10,66495	14,50	6,9898		0,14307	11,238
200,42	15,5167	11,03271	15,00	7,1917		0,13905	11,562
201,91	16,0006	11,40047	15,50	7,3925		0,13528	11,885
203,35	16,4845	11,76822	16,00	7,5930		0,13171	12,208
204,77	16,9684	12,13598	16,50	7,7926		0,12833	12,529
206,16	17,4523	12,50374	17,00	7,9917		0,12513	12,849
207,51	17,9362	12,87149	17,50	8,1900		0,12210	13,168
208,84	18,4201	13,23925	18,00	8,3879		0,11922	13,485
210,15	18,9040	13,60701	18,50	8,5845		0,11649	13,802
211,42	19,3879	13,97476	19,00	8,7815		0,11388	14,118
212,68	19,8718	14,34252	19,50	8,9771		0,11140	14,433
213,91	20,3556	14,71028	20,00	9,1725		0,10903	14,747

495. En outre, divers physiciens ont établi des formules empiriques pour relier la température à la force élastique de la vapeur ; ce sont : Dalton, Roche, Coriolis, Tredgold, Dulong et Arago.

La formule de Tredgold est :

$$t = 85\sqrt[6]{H} - 75, \quad \text{d'où} \quad H = \left(\frac{t + 75}{85}\right)^6.$$

t température de la vapeur en degrés centigrades;
H force élastique de la vapeur en centimètres de mercure.

Celle de Dulong et Arago est :

$$T = \frac{\sqrt[5]{p} - 1}{0{,}7153}, \quad \text{d'où} \quad p = (1 + 0{,}7153T)^5.$$

p force élastique de la vapeur en atmosphères;

T température de la vapeur en unités de 100° centigrades; la valeur de T tirée de la formule est positive ou négative suivant que la température de la vapeur est supérieure ou inférieure à 100°; ainsi la température de la vapeur étant 100°, la formule donne $T=0$; si la température est 140°, on a $T=0,40$, et si elle est 60°, on a $T=-0,40$

Nous avons calculé, à l'aide de ces deux formules, les colonnes 4 et 5 du tableau suivant. La 3ᵉ colonne contient des températures observées par Dulong et Arago, et la 2ᵉ, jusqu'à 25 atmosphères, des températures observées par Regnault, et qui sont fournies par sa formule, à l'aide de laquelle nous avons continué la colonne 2 au delà de 25 atmosphères.

TENSIONS en atmosphères.	TEMPÉRATURES CORRESPONDANTES				DIFFÉRENCES entre les colonnes	
	observées par Regnault.	observées par Dulong et Arago.	formule de Tredgold.	formule de Dulong et Arago.	4 et 2.	5 et 2
1	2	3	4	5	6	7
atm.						
1	100°,00	100°,00	99°,94	100°,00	−0°,06	0°
2	120 ,60	121 ,55	121 ,36	120 ,79	+0 ,76	0 ,19
3	133 ,91	135 ,00	135 ,09	134 ,35	1 ,18	0 ,44
4	144 ,00	144 ,95	145 ,41	144 ,67	1 ,41	0 ,67
5	152 ,22	153 ,30	153 ,76	153 ,09	1 ,54	0 ,77
6	159 ,22	160 ,00	160 ,82	160 ,25	1 ,60	1 ,03
8	170 ,81	172 ,13	172 ,40	172 ,10	1 ,59	1 ,29
10	180 ,31	182 ,00	181 ,78	181 ,77	1 ,47	1 ,46
15	198 ,80	200 ,48	199 ,73	200 ,48	0 ,93	1 ,68
20	213 ,01	214 ,70	213 ,22	214 ,72	0 ,21	1 ,71
25	224 ,72	»	224 ,14	226 ,33	−0 ,58	1 ,61
35	243 ,71		241 ,40	244 ,86	−2 ,31	1 ,15
50	265 ,71		260 ,78	265 ,83	−4 ,94	0 ,12
100	315 ,67		301 ,90	311 ,37		
200	378 ,81		348 ,05	363 ,58		
300	424 ,86		377 ,63	397 ,65		
400	463 ,48		399 ,86	423 ,57		
500	498 ,04		417 ,85	444 ,71		
600	530 ,17		433 ,06	462 ,70		
700	560 ,83		446 ,28	478 ,44		
800	590 ,68		458 ,01	492 ,47		
900	620 ,17		468 ,58	505 ,16		
1000	649 ,72		478 ,21	516 ,76		

Nous avons inséré dans les colonnes 6 et 7 les différences qui existent entre les températures fournies par les expériences de Regnault et celles calculées à l'aide de la formule de Tredgold et de celle de Dulong et Arago.

En comparant les résultats des colonnes 4 et 5 du tableau précédent à ceux de la 3ᵉ colonne, on voit que la formule de Tredgold représente mieux que celle de Dulong et Arago les températures observées par ces physiciens pour les pressions de 1 jusque vers 4 atmosphères.

Les colonnes 6 et 7 montrent que jusque vers 10 atmosphères les résultats de Regnault sont mieux représentés par la formule de Dulong

et Arago que par celle de Tredgold, et que c'est le contraire de 10 à 25 atmosphères.

Jusqu'à la pression de 27^{atm},5347, limite des expériences de Regnault, les résultats sont représentés avec la plus grande exactitude par la formule de ce physicien, et, comme le montrent les colonnes 6 et 7 du tableau précédent, avec une approximation suffisante pour la pratique par celles de Tredgold et de Dulong et Arago, quoique ces dernières aient été établies avant les expériences de Regnault.

Au delà de la limite 27^{atm},5347, laquelle des trois formules représente le mieux la relation entre la température et la pression? L'expérience seule peut répondre à cette question; mais l'expérience, si encore elle est possible, offre-t-elle un intérêt pratique suffisant pour mériter d'être entreprise? C'est douteux.

En observant dans la colonne 2 du tableau précédent, pour les pressions supérieures à 25 atmosphères, les résultats fournis par la formule de Regnault, on voit que de 100 à 200 atmosphères la température varie de 63°,14, que cette variation descend à 34°,56 quand la pression passe de 400 à 500 atmosphères, et qu'au delà cette variation reste à peu près constante pour chaque augmentation de 100 atmosphères de pression; ainsi elle est encore de 29°,55 quand la pression passe de 900 à 1 000 atmosphères. Or, tous les faits observés ne permettent guère de supposer que, même à des pressions qui dépassent 400 atmosphères, la température augmente de quantités à peu près égales pour des augmentations égales de la pression. Dalton a même admis la loi : que les températures croissant en progression arithmétique, les pressions croissent en progression géométrique. Ainsi la formule de Regnault, qui s'applique en toute rigueur pour des pressions atteignant jusqu'à 27^{atm},5347, doit être écartée pour les pressions très élevées.

Les différences de la colonne 6 subissent des oscillations beaucoup plus grandes que celles de la colonne 7, et, de plus, les températures fournies par la formule de Regnault, pour les pressions 35 et même 50 atmosphères, devant peu s'écarter des températures réelles, on voit que, pour les pressions très élevées, la formule de Tredgold doit donner des températures trop faibles, et que l'on pourra admettre, comme on l'a fait jusqu'ici, que les températures indiquées par la formule de Dulong et Arago doivent peu s'écarter des températures réelles.

496. Vapeur sèche et vapeur humide. Lorsque la vapeur se forme lentement dans un espace fermé dans lequel on a fait le vide, comme dans le tube d'un baromètre, cet espace et le liquide qu'on y a introduit étant maintenus longtemps à une température constante, la vapeur finit par se saturer en prenant la pression qui correspond à la température du vase et du liquide (494), et de plus on peut la considérer come *sèche*, c'est-à-dire comme entièrement privée de liquide dans toutes ses parties. Mais si la vapeur se forme et circule rapidement, comme dans les appareils de l'industrie, elle entraîne toujours une plus ou moins grande quantité de liquide non vaporisé, et elle prend le nom de *vapeur humide.*

La vapeur sèche est entièrement translucide; ainsi elle est invisible à la sortie de l'orifice par lequel elle s'échappe, et ce n'est qu'à $0^m,50$ environ de cet orifice qu'elle devient nuageuse, par suite de condensation d'une portion de la vapeur. La vapeur humide possède un aspect nuageux dans le vase même qui la renferme; c'est ce qu'on distingue à travers les parois du vase, si ces parois sont transparentes, et, dans tous les cas, à la sortie même de l'orifice par lequel elle s'échappe.

497. Vapeur sèche surchauffée. Quelques expériences faites par Fairbairn et Tate ont donné pour le coefficient de dilatation de la vapeur d'eau surchauffée au delà de la température de saturation, une valeur plus grande que pour l'air pour les 6 premiers degrés de surchauffement; mais au delà des 6 premiers degrés, le coefficient de dilatation est à peu près le même pour la vapeur que pour l'air, et il en diffère d'autant moins qu'on s'éloigne davantage de la température de saturation.

Cet excès du coefficient de dilatation de la vapeur d'eau sur celui de l'air, pour les 6 premiers degrés de surchauffement, doit être attribué sans doute à une petite quantité d'eau que contient la vapeur que nous considérons comme sèche; mais comme cette quantité d'eau ne peut être que très faible, on peut négliger son influence, et supposer, dans la pratique, que le coefficient de dilatation de la vapeur est uniformément égal à celui 0,003 67 de l'air. Ainsi, de même que l'air se dilate des 0,003 67 de son volume à 0° pour chaque augmentation de 1° de sa température, la vapeur se dilate des 0,003 67 de son volume à sa température de saturation pour chaque augmentation de 1° de cette température.

Attribuant au coefficient de dilatation cette dernière signification, on peut poser pour la vapeur, tant qu'elle reste sèche, les relations du n° 483.

Ainsi, $V = 1^{mc},3828$ étant le volume de 1 kilog. de vapeur, saturée à la température $t = 106°,36$ (page 648), le volume V' que prend ce kilog. de vapeur quand on porte sa température à $t' = 300°$ sous la même pression est :

$$V' = V\,[1 + a\,(t' - t)] = 1{,}3828\,[1 + 0{,}00367\,(300 - 106{,}36)] = 2^{mc},3655.$$

Si le volume de la vapeur reste constant, la pression $N = 1^{at},25$ devient :

$$N' = N\,[1 + a\,(t' - t)] = 1{,}25\,[1 + 0{,}00367\,(300 - 106{,}36)] = 2^{at},1383.$$

Tant qu'on ne descend pas au-dessous de la limite de saturation de la vapeur, on a :

$$V' = \frac{N}{N'}\,[1 + a\,(t' - t)], \qquad \text{ou} \qquad N' = N\,\frac{V}{V'}\,[1 + a\,(t' - t)].$$

Connaissant le volume, la pression et la température d'un kilog. de vapeur, le tableau page 646 indiquera, dans les cas les plus ordinaires, si la vapeur ne contient pas d'eau condensée.

La quantité de chaleur contenue dans un kilog. de vapeur surchauffée dans les conditions de l'application précédente est (488 et 490) :

$$606{,}5 + 0{,}305 \times 106{,}36 + 0{,}475\,(300 - 106{,}36) = 731.$$

Déterminons, pour comparaison, la quantité de chaleur contenue dans $1^{mc},3828$ de vapeur saturée à la pression de $2^{at},1383$.

A $2^{at},1565$ le poids de 1 mètre cube de vapeur saturée étant de $1^{k},1951$ (page 649), on pourrait simplement l'adopter pour le poids de 1 mètre cube de vapeur saturée à la pression de $2^{at},1383$; mais pour l'avoir avec plus d'exactitude, on a recours aux parties proportionnelles (*Int.* 404), ce qui donne :

$$1{,}1951 - (1{,}1951 - 1{,}1613)\,\frac{2{,}1565 - 2{,}1383}{2{,}1565 - 2{,}0901} = 1^{k},1858.$$

Le poids de $1^{mc},3828$ est alors $1{,}1858 \times 1{,}3828 = 1^{k},6397$.

La température de la vapeur saturée à $2^{at},1383$ est, en ayant encore, pour plus d'exactitude, recours aux parties proportionnelles :

$$123 - 1\,\frac{2{,}1565 - 2{,}1383}{2{,}1565 - 2{,}0901} = 122^{\circ},726.$$

La chaleur contenue dans $1^{mc},3828$ de vapeur à $2^{at},1383$ est alors (490) :

$$(606{,}5 + 0{,}305 \times 122{,}726)\,1{,}64 = 1\,056 \textit{ unités.}$$

Ce chiffre, comparé à celui de 731 que nous avons obtenu ci-dessus, montre, sous le rapport du combustible brûlé, le grand avantage de la vapeur surchauffée. L'altération des appareils qui contiennent la vapeur à la température à laquelle on risque de l'élever dans les diverses applications, et surtout des parties frottantes, commande des dispositions spéciales pour faire usage de cette vapeur comme force motrice.

498. Vapeur humide surchauffée. Considérons, comme au numéro précédent, un kilogramme de vapeur à la température de 106°,36, mais contenant 0,1 de son poids d'eau en suspension. En surchauffant cette vapeur, on transforme d'abord $0^{k},1$ d'eau à 106°,36 qu'elle contient en vapeur à 106°,36, ce qui exige (490) :

$$(606{,}5 + 0{,}305 \times 106{,}36)\,0{,}1 - 106{,}36 \times 0{,}1 = 53{,}26 \textit{ unités de chaleur.}$$

On a alors 1 kilog. de vapeur saturée à 106°,36, laquelle surchauffée donne lieu aux problèmes du numéro précédent.

1 kilog de vapeur saturée à 106°,36 a pour volume $1^{mc},3828$, et il contient :

$$606{,}5 + 0{,}305 \times 106{,}36 = 638{,}94 \textit{ unités de chaleur;}$$

ce qui fait pour un mètre cube de vapeur :

$$\frac{638{,}94}{1{,}3828} = 462{,}07 \textit{ unités.}$$

1 kilog. de vapeur à 106°,36 contenant 0,1 d'eau en suspension a pour volume :

$$1,3828 - 0,13828 = 1^{mc},2445,$$

et la quantité de chaleur qu'il contient est :

$$(606,5 + 0,305 \times 106,36)\,0,9 + 106,36 \times 0,1 = 585,68 \textit{ unités};$$

ce qui fait pour un mètre cube de vapeur :

$$\frac{585,68}{1,2445} = 470,61 \textit{ unités.}$$

Par mètre cube de vapeur la perte de chaleur est donc :

$$470,61 - 462,07 = 8,54 \textit{ unités},$$

c'est-à-dire les $\frac{8,54}{462,07}$, soit $\frac{1}{54}$, de la chaleur qu'exige la vapeur sèche.

L'eau en suspension doit aussi être élevée et introduite dans la chaudière, travaux qui absorbent inutilement une certaine quantité de chaleur. Ces pertes de chaleur, à part les inconvénients physiques ou mécaniques qui résultent nécessairement de la présence de l'eau en suspension, indiquent assez avec quels soins on doit rechercher les dispositions de générateurs qui fournissent la vapeur la mieux privée d'eau.

499. Vapeur détendue ou comprimée. De quelques observations, dont les résultats n'ont pas, sans doute, la rigueur fournie par des expériences de cabinet ou de laboratoire, il résulte que dans la pratique des machines à vapeur on peut admettre que la vapeur se détend, comme les gaz, suivant la loi de Mariotte (484).

Lorsque la vapeur est maintenue à une température constante, comme dans les cylindres à double enveloppe des machines à grande détente, on a même observé que la pression diminue un peu moins rapidement que ne l'indique la loi de Mariotte, ce qui est attribuable, sans doute, à la vaporisation, pendant la détente, de l'eau que la vapeur saturée peut contenir en suspension. Dans une machine à vapeur dont le cylindre n'est pas à double enveloppe, où par conséquent la vapeur est tenue moins exactement à une température constante pendant la détente, la pression paraît, au contraire, descendre un peu plus rapidement que ne l'indique la loi de Mariotte.

Comme dans l'un et l'autre cas l'écart a, du reste, été faible, on peut donc pratiquement admettre que la vapeur saturée et sèche, maintenue à une température constante, se comporte comme un gaz quand on augmente son volume, et que, à moins d'un refroidissement ou de toute autre circonstance exceptionnelle, on peut encore admettre que la loi de Mariotte est applicable dans les cas ordinaires des machines à vapeur à détente.

Quand on comprime de la vapeur détendue maintenue à une température constante, la compression a lieu suivant la loi de Mariotte jus-

qu'au point de saturation de la vapeur. A partir de ce point, toute diminution de volume ne s'effectue que par la condensation d'une certaine quantité de vapeur, et de cette condensation résulte un dégagement de chaleur qui augmente la température du liquide formé et de la vapeur non condensée, et par suite la pression, qui ne varie plus que d'après la température et non d'après le volume.

Que la vapeur soit détendue ou surchauffée, on peut, dans une certaine limite, augmenter sa pression, ou diminuer sa température, ou encore à la fois augmenter sa pression et diminuer sa température, sans qu'il y ait de condensation. La condensation ne commence que quand la pression et la température atteignent simultanément la limite à laquelle la vapeur est saturée (494).

500. Pression de la vapeur dans une enceinte dont toutes les parties ne sont pas à la même température. On admet, dans la plupart des applications, que cette pression est partout égale à celle de la vapeur saturée à la température du point le plus froid de l'enveloppe, la vapeur se condensant contre ce point jusqu'à ce que sa pression corresponde à cette température.

C'est en effet la pression qui doit se réaliser promptement dans toute la masse, si c'est toujours la même vapeur qui est dans l'enveloppe, si elle ne se renouvelle pas par suite de condensation ou de courant. La vapeur en contact avec le point le plus froid est saturée, et l'autre est d'autant plus surchauffée qu'elle se trouve dans une région plus chaude de l'enceinte. Mais comme en général dans la pratique on a affaire à un courant de vapeur, on conçoit que l'égalité de pression ne peut pas se réaliser, et cela d'autant moins que le courant est plus rapide.

501. Mélange des gaz et des vapeurs, et des vapeurs entre elles. En agitant ensemble, dans un même vase, plusieurs liquides qui ne se combinent pas chimiquement, et les laissant ensuite en repos, ils peuvent rester mêlés pendant quelques instants, mais peu à peu ils se séparent l'un de l'autre pour se superposer dans l'ordre de leur densité; c'est ainsi que l'huile se superpose à l'eau.

Pour les fluides élastiques les choses ne se passent pas ainsi : sans qu'il soit nécessaire de produire aucune agitation, lorsqu'on introduit dans le même espace divers fluides élastiques qui sont sans action chimique l'un sur l'autre, chacun se répand dans toute l'étendue de cet espace comme s'il était seul, et la force élastique du mélange est égale à la somme des forces élastiques que prendraient les fluides si un à un ils occupaient successivement l'espace.

S'il s'agit d'un mélange de gaz et de vapeur, celle-ci peut saturer l'espace et être à la tension maximum correspondant à la température du mélange (494). Mais on conçoit aussi qu'elle peut ne pas saturer l'espace et se trouver dans le mélange à une tension quelconque inférieure à la tension de saturation. C'est ce qui arrive si la vapeur introduite dans le mélange n'est pas en quantité suffisante pour saturer l'espace qu'il occupe, ou si cet espace étant saturé, on augmente le volume du mélange ou sa température. En comprimant un mélange non saturé

de vapeur, ou en abaissant la température, on peut l'amener au point de saturation, point à partir duquel toute compression ou abaissement de température produit la condensation d'une certaine quantité de vapeur.

Dalton a le premier indiqué une loi qu'on peut énoncer ainsi : *Lorsqu'un liquide, en quantité suffisante, est introduit dans un espace limité rempli d'un gaz qui n'exerce aucune action chimique sur ce liquide, il se vaporise autant de liquide que si l'espace était vide;* seulement la vaporisation est moins prompte. *De plus, la force élastique de la vapeur formée est la même que si le gaz n'existait pas, et elle s'ajoute à celle de ce gaz; de sorte que la force élastique d'un mélange de gaz et de vapeur est égale à la force élastique du gaz occupant seul l'espace, augmentée de celle de la vapeur correspondant à la température du mélange* (494).

On indique dans les cours de physique un appareil à l'aide duquel Gay-Lussac aurait vérifié la loi de Dalton; mais comme on ne trouve rien de précis relativement aux expériences de l'un et de l'autre de ces physiciens, Regnault a exécuté sur ce sujet des expériences, dont les résultats ont été publiés dans les *Comptes rendus de l'Académie des sciences* (XXXIX, 1854).

L'appareil de Gay-Lussac ne permet d'expérimenter qu'à la température ordinaire; au lieu que celui de Regnault peut être porté à différentes températures, et en en faisant usage, il a comparé successivement, dans l'air et dans le vide, les tensions des vapeurs d'eau, d'éther, de sulfure de carbone et de benzine.

Toujours la tension dans l'air a été plus faible que dans le vide, mais de si peu que Regnault pense qu'on doit continuer à admettre la loi de Dalton comme rigoureuse théoriquement, et attribuer les légères différences constatées à l'affinité hygroscopique des parois de l'enveloppe, qui ramène la vapeur à une tension variable et toujours inférieure à celle qui répond à la saturation.

Pour la vapeur d'eau, entre 0 et 40°, la différence s'est élevée à environ 1/50 de la tension dans le vide; pour la vapeur de carbone, à environ 1/100, et pour les vapeurs d'éther et de benzine, elle s'est élevée dans quelques cas à 1/20 ou 1/30.

Regnault a fait aussi des expériences dans le but de vérifier si la loi de Dalton s'applique aux mélanges de vapeurs entre elles, ce que l'on admettait auparavant.

Les mélanges binaires suivants, de substances volatiles qui n'exercent pas d'action dissolvante sensible l'une sur l'autre : de l'eau avec le sulfure de carbone, avec le chlorure de carbone C^2Cl^6, et avec la benzine, vérifient la loi de Dalton; ils donnent, dans le vide, une tension de vapeur égale à la somme des tensions que ces substances fournissent isolément.

Il n'en est plus de même pour les mélanges binaires de deux liquides qui se dissolvent. Ainsi celui d'eau et d'éther fournit, entre 15°,56 et 24°,21, une vapeur dont la tension est à peine égale à celle de la va-

peur d'éther seule. Celui d'éther et de sulfure de carbone entre — 16°,71 et 39°,44, et celui de chlorure de carbone et de sulfure de carbone entre 8°,75 et 48°,43, donnent une vapeur dont la tension est en général plus petite que celle de la vapeur fournie par le liquide le plus volatil seul; elle dépend d'ailleurs des proportions relatives des deux liquides. Pour la benzine et l'alcool, entre 7°,22 et 18°,59, la tension de leur mélange est un peu plus grande que celle de la vapeur du liquide le plus volatil seul, et sensiblement moins grande que la somme des tensions que les deux liquides fournissent isolément.

En admettant la loi de Dalton, V étant le volume d'un gaz saturé de vapeur à la température t°, et H' la pression du mélange, le tableau page 646 donne la tension H de la vapeur à t°, et H' — H est la force élastique du gaz. Ayant alors les volumes, les températures et les tensions du gaz et de la vapeur, on peut déterminer le poids de chacun de ces deux corps entrant dans le mélange.

Pour 1 mètre cube d'air saturé sous la pression atmosphérique 0m,76, le poids q de la vapeur est donné par la formule du n° 494 :

$$q = \frac{0,622 \times 1,293187\,H}{0,76(1 + 0,003\,67\,t)},$$

qui fournit la valeur de q de la 5e colonne de la table page 646; ainsi, par exemple, 1 mètre cube d'air saturé à 25° et sous la pression 0m,76 contient 0k,02283 de vapeur.

502. Influence des matières dissoutes dans un liquide à vaporiser. Dans un vase de verre, l'eau bout avec soubresauts, et l'ébullition n'a lieu, d'après Gay-Lussac, qu'à une température de 1°,3 plus élevée que dans un vase métallique. L'acide sulfurique présente le même phénomène, et les soubresauts sont d'autant plus violents que le liquide a plus de cohésion et qu'il exerce sur la matière du vase une action moléculaire plus grande. Quelques parcelles métalliques projetées dans le vase arrêtent les soubresauts, et la température devient celle qu'on obtiendrait dans un vase métallique.

Le point d'ébullition des liquides n'est pas changé par les corps étrangers qui n'y sont que mécaniquement mélangés, comme les particules de sable, de sulfate de chaux, de carbonate de chaux, etc.; mais il est toujours modifié par les matières chimiquement combinées au liquide; ainsi tous les sels solubles retardent le point d'ébullition de l'eau, et l'expérience prouve :

1° Que la vapeur produite à la surface des dissolutions salines est de la vapeur d'eau pure;

2° Que la tension de la vapeur dans un espace limité et à une température donnée est moindre que celle de la vapeur produite par de l'eau pure, et qu'elle varie avec la nature du sel dissous;

3° Que sous la pression 0m,76, la température de la vapeur formée est toujours de 100°, quelle que soit la nature du sel dissous et du vase contenant la dissolution.

Tableau des points d'ébullition de quelques dissolutions saturées sous la pression 0m,76, d'après les expériences de M. Legrand (491).

DÉSIGNATION DES SELS DISSOUS.	TEMPÉRATURES d'ébullition, en degrés centigrades.	QUANTITÉS de sel qui saturent 100 d'eau.
Chlorate de potasse	104,2	61,5
Chlorure de baryum	104,4	60,1
Carbonate de soude	104,6	48,5
Phosphate de soude	105,5	113,2
Chlorure de potassium	108,3	59,4
Chlorure de sodium	108,4	41,2
Hydrochlorate d'ammoniaque	114,2	88,9
Tartrate neutre de potasse	114,67	296,2
Nitrate de potasse	115,9	335,1
Chlorure de strontium	117,9	117,5
Nitrate de soude	121,0	224,8
Acétate de soude	124,37	209,0
Carbonate de potasse	135,0	205,0
Nitrate de chaux	151,0	362,2
Acétate de potasse	169,0	798,2
Chlorure de calcium	179,5	325,0
Nitrate d'ammoniaque	180,0	infini

503. Tensions des vapeurs autres que la vapeur d'eau. D'après Dalton, les vapeurs de tous les liquides ayant des tensions égales à des températures également éloignées de celles de leur point d'ébullition sous la pression 0m,76, il sera facile, au moyen du tableau page 646 et de ceux des nos 491 et 492, qui donnent la température d'ébullition de quelques liquides, d'avoir la force élastique de la vapeur de ces liquides à une température quelconque. Ainsi la force élastique de la vapeur d'alcool à $78° + 20° = 98°$, sera la même que celle de la vapeur d'eau à $100° + 20° = 120°$; elle sera donc de 1,962 atmosphères (p. 649).

D'après les observations de plusieurs physiciens, il résulte que la loi si commode de Dalton n'est pas absolument rigoureuse, et qu'à de grandes distances des points d'ébullition elle s'écarte sensiblement de la vérité. C'est ce que confirme la table suivante, due aux expériences de Regnault (*Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 1854, XXXIX, p. 304).

TEMPÉRATURES.	FORCES ÉLASTIQUES EN CENTIMÈTRES DE MERCURE.					
	Eau.	Vapeur d'alcool.	Vapeur d'éther.	Sulfure de carbone.	Chloroforme.	Essence de térébenthine.
— 21°	0,077	0,31	»	»	»	»
— 20	0,084	0,33	6,92	»	»	»
— 16	0,118	»	»	5,88	»	»
— 10	0,196	0,65	11,32	7,90	»	»
0	0,46	1,27	18,23	12,73	»	0,21
10	0,92	2,41	28,65	19,93	13,04	0,23
20	1,74	4,40	43,48	29,82	19,02	0,43
30	3,15	7,84	63,70	43,46	27,61	0,70
40	5,49	13,41	91,36	61,75	36,40	1,12
50	9,20	22,03	126,80	85,27	52,43	1,72
60	14,88	35,00	173,03	116,26	73,80	2,69
70	23,31	53,92	230,95	154,90	97,62	4,19
80	35,46	81,28	294,72	203,05	136,78	6,12
90	52,55	119,04	389,90	262,31	181,15	9,10
100	76,00	168,50	492,04	332,13	235,46	13,49
110	107,54	235,18	624,90	413,63	302,04	18,73
116	131,15	»	707,62	»	»	»
120	149,13	320,78	»	512,16	381,80	25,70
130	203,03	433,12	»	626,06	472,10	34,70
136	242,32	»	»	702,92	»	»
140	271,76	563,77	»	»	»	46,23
150	358,12	725,78	»	»	»	60,45
152	377,77	761,73	»	»	»	»
160	465,16	»	»	»	»	77,72
170	596,17	»	»	»	»	98,90
180	754,64	»	»	»	»	122,50
190	944,27	»	»	»	»	151,47
200	1168,90	»	»	»	»	186,56
210	1432,48	»	»	»	»	225,12
220	1739,04	»	»	»	»	269,03
222	1805,86	»	»	»	»	277,85

SOURCES DE FROID

504. *Tableau du froid produit par quelques mélanges frigorifiques.*

DÉSIGNATION DES MÉLANGES.	ABAISSEMENT de température.	FROID produit.
Eau, 16 parties; nitre, 5; hydrochlorate d'ammoniaque, 5.	de + 10° à — 12°	22°
Eau, 16; hydrochlorate d'ammoniaque, 5; nitre, 5; sulfate de soude, 8.	de + 10 à — 16	26
Eau, 1; nitrate d'ammoniaque, 1.	de + 10 à — 16	26
Eau, 1; nitrate d'ammoniaque, 1; sous-carbonate de soude, 1.	de + 10 à — 19	29
Neige, 1; sel marin, 1.	de 0 à — 17,77	17,77
Neige, 2; hydrochlorate de chaux, 3.	de 0 à — 27,77	27,77
Neige 3; potasse, 4.	de 0 à — 28,33	28,33
Neige, 1; acide sulfurique étendu, 1.	de — 6,66 à — 51	44,34
Neige ou glace pilée, 2; sel marin, 1.	de — 17,77 à — 20,55	2,78
Neige et acide nitrique étendu.	de — 17,77 à — 43,33	25,56
Neige, 1; hydrochlorate de chaux, 2.	de — 17,77 à — 54,44	36,67

DÉSIGNATION DES MÉLANGES.	ABAISSEMENT de température.	FROID produit.
Neige ou glace pilée, 1; sel marin, 5; hydrochlorate d'ammoniaque et nitrate de potasse, 5.	de — 20°,55 à — 27°,77	7°,22
Neige, 2; acide sulfurique étendu, 1; acide nitrique étendu, 1.	de — 23,33 à — 48,88	25,55
Neige ou glace pilée, 12; sel marin, 5; nitrate d'ammoniaque, 5.	de — 27,77 à — 31,66	3,89
Neige, 1; hydrochlorate de chaux, 3.	de — 40 à — 58,33	18,33
Neige, 8; acide sulfurique étendu, 8.	de — 55,55 à — 68,33	12,78
Sulfate de soude, 3; acide azotique étendu, 2.	de + 10 à — 19	29
Sulfate de soude, 6; sel ammoniac, 4; nitre, 2; acide azotique étendu, 4.	de + 10 à — 23	33
Sulfate de soude, 6; nitrate d'ammoniaque, 5; acide azotique étendu, 4.	de + 10 à — 26	36
Phosphate de soude, 9; acide azotique étendu, 4.	de + 10 à — 29	39
Sulfate de soude, 20; acide sulfurique à 36°,16.	de + 10 à — 8,15	18,15
Sulfate de soude, 22; résidu d'éther à 33°,17.	de + 10 à — 8	18
Sulfate de soude, 8; acide chlorhydrique, 5.	de + 10 à — 17	27

Ce tableau montre qu'après avoir obtenu un premier froid à l'aide d'un mélange frigorifique, on peut encore l'augmenter en faisant usage d'un second mélange.

505. *Tableau des abaissements de température obtenus par Gay-Lussac, en faisant arriver un courant d'air desséché au chlorure de calcium sur un thermomètre dont la boule était recouverte d'une batiste humide.*

TEMPÉRATURES de l'air sec.	ABAISSEMENTS de température.	TEMPÉRATURES de l'air sec.	ABAISSEMENTS de température.	TEMPÉRATURES de l'air sec.	ABAISSEMENTS de température.
0°	5°,82	9°	8°,61	18°	11°,96
1	6 ,09	10	8 ,97	19	12 ,34
2	6 ,37	11	9 ,37	20	12 ,73
3	6 ,66	12	9 ,70	21	13 ,12
4	6 ,96	13	10 ,07	22	13 ,51
5	7 ,27	14	10 ,44	23	13 ,90
6	7 ,59	15	10 ,82	24	14 ,30
7	7 ,92	16	11 ,20	25	14 ,70
8	8 ,26	17	11 ,58		

506. Faraday, en plaçant sous la cloche d'une machine pneumatique une pâte d'acide carbonique solidifié et d'éther (507), et en faisant fonctionner la machine, a obtenu, pour des pressions sous la cloche, en centimètres de mercure :

72, 49,3 23,9 18,8 13,7 8,6 6,1 3,5 3,0,

les températures :

—77° —80° —85° —87° —91° —95° —99° —107° —110°.

LIQUÉFACTION ET SOLIDIFICATION DES GAZ

507. Liquéfaction et solidification des gaz. On est déjà parvenu à liquéfier et même à solidifier la plupart des gaz, et il est certain que tous pourraient l'être s'il était possible de produire des températures assez basses et de fabriquer des vases assez résistants.

A — 80°, et sous une pression inférieure à 1 atmosphère (506), Faraday a obtenu à l'état liquide ou à l'état solide les gaz suivants :

Chlore, cyanogène, ammoniaque, acide sulfhydrique, hydrogène arséniqué, acide iodhydrique, acide bromhydrique, acide carbonique.

Températures de fusion observées par Faraday pour les gaz qu'il a pu solidifier (476) :

Cyanogène.	— 35°	Oxyde de chlore. .	— 60°	Acide sulfhydrique . .	— 86°
Acide iodhydrique.	— 51	Ammoniaque. . . .	— 75	Acide bromhydrique. .	— 88
Acide carbonique .	— 58	Acide sulfureux . .	— 76	Protoxyde d'azote . . .	— 100

L'*hydrogène* a été liquéfié par M. Cailletet, puis par M. Raoul Pictet, et enfin par MM. Wroblewski et Olszewski. Ces derniers, en produisant une brusque détente de l'hydrogène comprimé à environ 180 atmosphères, et refroidi au-dessous de — 200° par l'évaporation rapide de l'azote liquide, ont obtenu un liquide en ébullition avec projection de mousse.

Les mêmes expérimentateurs ont encore liquéfié : l'*oxygène* à — 136°, sous la pression de 22 atmosphères dans un tube refroidi par l'évaporation rapide de l'éthylène liquide dans le vide; — l'*azote*, à — 194°, sous la pression atmosphérique; — le *bioxyde d'azote*, à — 154°, sous la pression atmosphérique; — l'*oxyde de carbone*, à — 190°, sous la pression atmosphérique.

L'*azote* a été solidifié à — 204°, sous une pression de 60 millimètres de mercure; — le *protoxyde d'azote*, à — 167°, sous la pression de 138 millimètres; — l'*oxyde de carbone*, à — 200°, sous la pression de 100 millimètres.

Faraday obtenait le froid à l'aide de la machine pneumatique et la pression du gaz au moyen d'un système de deux pompes de diamètres différents. M. Cailletet a employé un appareil spécial, bien plus énergique.

Maximums de tension des trois gaz qui se liquéfient le plus facilement.

TEMPÉRATURES	GAZ SULFUREUX.	CYANOGÈNE.	AMMONIAQUE.
	atm.	atm.	atm.
— 18°	0,7	1,2	2,5
0	1,5	2,4	4,4
+ 4,4	1,8	2,8	5,0
32	4,3	6,2	11,0
38	5,1	7,3	»

Tableau des températures en degrés centigrades et des pressions en atmosphères correspondant à la liquéfaction de quelques gaz.

TEMPÉRATURES.	GAZ oléfiant. (éthylène)	ACIDE carbonique.	PROTOXYDE d'azote.	GAZ chlorhydrique.	GAZ sulfhydrique.	HYDROGÈNE arséniqué.
deg.	atm.	atm.	atm.	atm.	atm.	atm.
−87,2	»	»	1,0	»	»	»
78,9	»	1,2	1,4	»	»	»
73,3	9,3	1,8	1,8	1,8	1,0	»
59,4	»	4,6	3,6	»	»	0,9
51,1	13,9	7,1	5,4	5,1	1,9	1,4
40,0	17,0	11,1	8,7	7,7	2,9	2,3
28,9	21,2	16,3	13,3	10,9	4,2	3,5
17,8	27,2	22,8	19,3	15,0	6,1	5,2
6,7	36,8	30,7	26,8	21,1	8,4	7,4
1,1	42,5	37,2	31,1	25,3	9,9	8,7
+ 2,4	»	»	»	30,7	11,8	10,0

D'après des expériences de Pouillet :

L'acide carbonique se liquéfie à		10°	sous la pression de	45	atmosphères,
Le protoxyde d'azote	*id.*	11	*id.*	43	
L'ammoniaque	*id.*	10	*id.*	5	
Le gaz sulfureux	*id.*	8	*id.*	2,5	

C'est M. Thilorier qui a le premier obtenu, en grande masse, l'acide carbonique à l'état liquide et à l'état solide. L'acide carbonique liquide, étant renfermé dans un réservoir assez résistant, en lui donnant une issue au moyen d'un robinet de forme convenable, se vaporise vivement sous la pression atmosphérique, et la chaleur latente qu'il absorbe abaisse la température au point de congeler la portion d'acide restée dans le réservoir. Sa température est en effet de 50 ou 60° au-dessous de zéro. Abandonné à l'air, l'acide carbonique solide se vaporise sans se liquéfier. En versant sur un demi-litre ou un litre d'acide carbonique solide une quantité convenable d'éther sulfurique, on obtient une pâte semi-fluide qui se conserve plus longtemps que l'acide carbonique seul, et qui donne un contact plus parfait, soit avec les thermomètres, soit avec les corps à refroidir. C'est cette pâte que Faraday a employée pour faire ses expériences (506).

PUISSANCES CALORIFIQUES DES COMBUSTIBLES

508. Puissances calorifiques et pouvoirs rayonnants des combustibles. On appelle *puissance calorifique d'un combustible*, la quantité de chaleur que dégage, en se brûlant complètement, 1 kilogramme de ce combustible. La puissance calorifique d'un même combustible est constante, quelles que soient d'ailleurs les circonstances dans lesquelles s'opère la combustion.

D'après Tresca, la puissance calorifique du gaz d'éclairage (carbone, 0,62, hydrogène, 0,21, oxygène, 0,17) = 10000 calories.

Tableau des puissances calorifiques de quelques matières combustibles, en unités de chaleur (486) : 1° d'après Dulong : 2° d'après les expériences de Favre et Silbermann : 3° d'après leur composition, en prenant 34462 *pour la puissance calorifique de l'hydrogène et* 8080 *pour celle du carbone.*

DÉSIGNATION DES MATIÈRES.	DULONG.	FAVRE et SILBERMANN.	COMPOSITION.
Hydrogène	34 742	34 462	»
Carbone	7 170	8 080 (*)	»
Graphite naturel	»	7 796	»
Diamant	»	7 770	»
Carbone passant à l'état d'oxyde, 8080—5607=2473	1 386	2 473	»
Poids (2k,333) d'oxyde renfermant 1 kilogramme de carbone, 2403×2,333=5607	5 784	5 607	»
Oxyde de carbone (composition en poids : carbone 0,428, oxygène 0,572)	2 488	2 403	»
Hydrogène protocarboné (carbone 0,75, hydrogène 0,25)	13 205	13 063	14 676
Hydrogène bicarboné (carbone 0,8571, hydrogène 0,1429)	12 032	11 858	11 850
Éther sulfurique (carbone 0,6531, hydrogène 0,1333, oxygène 0,2136 ; soit carbone 0,6531, hydrogène 0,1066, eau 0,2403)	9 430	9 027	8 950
Alcool (carbone 0,5265, hydrogène 0,1290, oxygène 0,3445 ; soit carbone 0,5265, hydrogène 0,0865, eau 0,3870)	6 855	7 184	7 235
Esprit de bois	»	5 301	»
Essence de térébenthine (carbone 0,8824, hydrogène 0,1176)	10 836	10 852	10 946
Soufre	2 601	2 240	»
Sulfure de carbone	»	3 400	»
Cire (carbone 0,816, hydrogène 0,139, oxygène 0,045 ; soit carbone 0,816, hydrogène 0,1333, eau 0,0507)	»	10 496	11 186
Huile d'olive (carbone 0,7721, hydrogène 0,1336, oxygène 0,0943)	9 862	»	10 435
Suif (carbone 0,79, hydrogène 0,117, oxygène 0,093)	»	»	10 035

D'après Rumford.	Suif	8 639
	Huile de colza épurée	9 307
	Naphte, densité = 0,827	7 338

(*) Ce résultat a été fourni par du charbon de bois fortement calciné, en tenant compte de l'oxyde de carbone formé ; en négligeant cet oxyde, la puissance calorifique ne serait que de 7 833.

Pendant longtemps on a admis que la puissance calorique d'un combustible était proportionnelle à la quantité d'oxygène nécessaire à sa combustion : c'est ce que semblaient confirmer les puissances calorifiques du carbone et de l'hydrogène obtenues par M. Despretz ; mais cette loi a été démentie par les expériences de Dulong, qui ont donné pour le carbone et l'hydrogène des puissances calorifiques qui sont loin d'être dans le rapport des quantités d'oxygène absorbées.

Tableau des puissances calorifiques des combustibles généralement employés dans l'industrie, et des quantités de chaleur que rayonnent ces combustibles en brûlant, en supposant leurs puissances calorifiques égales à l'unité (536, 537 et 539).

DÉSIGNATION DES COMBUSTIBLES.	PUISSANCES calorifiques.	POUVOIRS rayonnants.
Bois desséché à 140°.	4 000	0,28
Bois ordinaire à 0,25 d'eau.	3 000	0,25
Charbon de bois à 0,07 de cendres et 0,07 d'eau. . .	7 000	0,50
Tannée sèche.	3 400	»
Tannée à 0,30 d'eau.	2 400	»
Tourbe desséchée à 60°.	5 300	0,25
Tourbe à 0,30 d'eau.	3 750	0,25
Charbon de tourbe à 0,20 de cendres.	6 400	0,50
Houille moyenne.	8 000	0,55
Coke à 0,05 de cendres.	7 600	*id.*
Coke à 0,125 de cendres.	7 000	*id.*
Anthracite.	8 000	»
Lignite.	6 500	»
Huile.	10 000	0,18

De ce tableau il résulte que la quantité de chaleur rayonnée par la flamme est très faible relativement à celle rayonnée par le charbon.

Tableau des quantités de chaleur moyennes produites par une mesure de volume de quelques combustibles. Ces quantités de chaleur ont été obtenues en multipliant les puissances calorifiques des combustibles par le poids en kilogrammes de leur mesure de volume.

DÉSIGNATION DES MESURES.	DÉSIGNATION DES COMBUSTIBLES.	CHALEUR produite en unités.
1 hectolitre.	Houille de moyenne qualité. . . .	630 000
1 corde de 4 mètres cubes. . .	Noyer (d'une année de coupe).	7 742 000
Id.	Chêne blanc *id.*	6 846 000
Id.	Frêne *id.*	5 974 000
Id.	Hêtre *id.*	5 603 000
Id.	Orme *id.*	4 487 000
Id.	Bouleau *id.*	4 102 000
Id.	Châtaignier *id.*	4 035 000
Id.	Charme *id.*	5 572 000
Id.	Pin *id.*	4 263 000
Id.	Peuplier d'Italie *id.*	3 069 000
1 hectolitre.	Charbon de noyer.	292 000
Id.	*Id.* de chêne.	255 000
Id.	*Id.* de frêne.	219 000
Id.	*Id.* de hêtre.	176 000
Id.	*Id.* d'orme.	167 000
Id.	*Id.* de bouleau.	153 000
Id.	*Id.* de châtaignier.	146 000
Id.	*Id.* de charme.	176 000
Id.	*Id.* de pin.	160 000
Id.	*Id.* de peuplier d'Italie. . .	109 000
1 hectolitre comble.	Coke.	230 000
1 corde pesant 2 000 kilog. . .	Tourbe de Beauvais, 2ᵉ qualité. .	7 200 000

COMBUSTIBLES

509. Combustibles. Les combustibles le plus généralement employés dans l'industrie sont le bois, le charbon de bois, la tannée, la tourbe, le charbon de tourbe, la houille et le coke.

Le carbone et l'hydrogène sont les deux principaux éléments utiles qui composent les combustibles.

C'est entre les températures de 400 et 500° que les combustibles commencent à brûler en donnant de la lumière (477).

510. Bois. Un hectare de forêt produit par an de 2200 à 3600 kilog. de bois sec. Le bois est formé : 1° d'une matière que Payen a appelée cellulose, qui constitue la charpente solide de toutes les plantes, et qui se compose de 0,444 de carbone et de 0,556 d'oxygène et d'hydrogène dans les proportions convenables pour faire de l'eau; 2° d'une matière incrustante de composition variable avec la nature des bois, très riche en carbone, et contenant un petit excès d'hydrogène sur la quantité nécessaire à la composition de l'eau. Le bois contient en outre moyennement 0,015 de matières étrangères qui donnent naissance aux cendres lors de la combustion : les bois de chauffage ordinaires contiennent à peu près 0,02 de ces matières étrangères.

Le bois vert contient de 0,37 à 0,48 d'eau, qu'il peut perdre sans que sa nature soit altérée; celui de 4 à 5 mois de coupe, employé au charbonnage, en contient de 0,30 à 0,35, et celui de chauffage de 8 à 12 mois de coupe, de 0,20 à 0,25.

Il faut éviter de faire la coupe des bois lorsqu'ils sont en pleine sève; ainsi, la saison d'hiver doit être choisie pour l'effectuer. On peut considérer quinze à vingt ans comme l'âge du bois à charbon, vingt-cinq à trente ans comme celui du bois à brûler, et cent ans et au-dessus comme celui du bois d'œuvre.

La France possède une étendue boisée de 9 millions d'hectares (voir p. 672) elle consomme 25 millions de stères de bois (dont 18 pour le chauffage); la moitié lui vient de l'étranger. Elle produit pour 190 millions de francs de bois par an. (Voir une étude de M. L.-A. Barré sur les Richesses forestières du globe, *Génie civil*, nos 24, 25, 26, t. XV, 1889.)

Des analyses faites par Dumas sur différents bois réduits en poudre et desséchés à 140° ont donné en moyenne les compositions suivantes, sans variations sensibles :

	Carbone.	Hydrogène.	Oxygène.	Azote.	Cendres.
Bois	0,4970	0,0616	0,4130	0,0105	0,018
Fagots	0,5046	0,0614	0,3965	0,0111	0,025

D'où il résulte qu'on peut admettre pour la composition des bois desséchés à 140° : carbone 0,50, hydrogène 0,06, oxygène 0,41, azote 0,01, cendres 0,02; soit : carbone 0,50, hydrogène libre 0,01, hydrogène et

oxygène dans le rapport nécessaire pour faire de l'eau 0,46, azote 0,01, cendres 0,02.

La puissance calorifique du bois desséché à 140° est alors :

$$0,50 \times 8080 + 0,01 \times 34\,462 = 4385. \qquad (537)$$

Rumford, à l'aide de son *calorimètre*, a obtenu 2550 pour la puissance calorifique des bois à brûler ordinaires, et 3450 à 3960 pour différents bois préalablement desséchés sur un poêle.

Les deux expériences suivantes, faites sur une grande échelle, semblent, comme le remarque Péclet, assigner au bois une puissance calorifique se rapprochant plus de la puissance calorifique théorique que celle obtenue en petit par Rumford.

Dans une expérience faite aux anciens bains du pont Marie, en deux heures, on a brûlé 200 kilog. de bois pelard et produit un effet équivalent à 7180 kilog. d'eau chauffés de 85°, soit un effet de 3000 unités de chaleur par kilog. de bois. Admettant que ce bois contenait 0,25 d'eau, la puissance calorifique du bois sec serait 4000.

A Wesserling, dans une chaudière chauffée au bois, on a obtenu, pour la moyenne de plusieurs jours d'expérience, $3^k,24$ de vapeur par kilog. de bois; la fumée, à son entrée dans la cheminée, était à 250°, et elle contenait encore 10 p. 100 d'oxygène, c'est-à-dire que la moitié seulement de l'oxygène de l'air avait été employée à la combustion. A l'aide de ces chiffres, on arrive à 2800 pour la puissance calorifique du bois employé, soit, selon qu'on suppose que ce bois contient 0,25 ou 0,30 d'eau, 3733 ou 4000 pour la puissance calorifique du même bois sec.

De tous les faits observés il résulte : 1° que tous les bois au même état de dessiccation produisent sensiblement la même quantité de chaleur; 2° que pour les bois parfaitement desséchés artificiellement la puissance calorifique est d'environ 4000, et que pour les bois à l'état ordinaire de dessiccation, qui renferment à peu près 0,25 à 0,30 d'eau, la puissance calorifique varie de 3000 à 2800 (539).

D'après Péclet, la quantité de chaleur rayonnée par le bois de hêtre en petits morceaux est à la quantité de chaleur entraînée par la fumée dans le rapport de 1 à 2,5, et, par suite, à la quantité totale de chaleur développée, dans celui de 1 à 3,5; ces rapports sont beaucoup plus grands pour les bois en gros morceaux donnant des charbons volumineux très rayonnants (page 668).

Péclet a reconnu aussi que le pouvoir rayonnant était variable pour les différents bois en morceaux ordinaires, mais qu'il était à peu près le même pour tous les bois en petits morceaux.

En France, on appelle : 1° *bois neuf*, le bois qui a été transporté au lieu de consommation par voiture ou par bateau; 2° *bois flotté*, celui qui a été transporté en trains flottants; 3° *bois pelard*, le bois de chêne écorcé.

511. *Tableau de la composition du bois pris dans les diverses parties d'un arbre et desséché à* 80°, d'après les analyses de M. Violette, directeur de la poudrerie d'Esquerdes. Les feuilles desséchées à 100° ont perdu 60 pour 100 d'eau et les branches 45.

COMBUSTIBLES.		CARBONE.	HYDROGÈNE.	OXYGÈNE et AZOTE.	CENDRES.
Feuilles		45,015	6,971	40,910	7,118
Petites branches	Écorce	52,496	7,312	36,737	3,454
	Bois	48,359	6,605	44,730	0,304
Moyennes branches	Écorce	48,855	6,342	41,121	3,682
	Bois	49,902	6,607	43,356	0,134
Grosses branches	Écorce	46,871	5,570	44,656	2,903
	Bois	48,003	6,472	45,170	0,354
Tronc	Écorce	46,267	5,930	44,755	2,657
	Bois	48,925	6,460	44,319	0,296
Grosses racines	Écorce	49,085	6,024	48,761	1,129
	Bois	49,324	6,286	44,108	0,231
Moyennes racines	Écorce	50,367	6,069	41,920	1,643
	Bois	47,390	6,259	46,126	0,223
Racines chevelues avec écorce		45,063	5,036	43,503	5,007

Sous le rapport de leur emploi comme combustible, on divise les bois en deux classes. La première comprend les bois durs et compacts, ceux dont la densité est la plus grande : tels que le chêne, le hêtre, l'orme, le frêne, etc. La seconde renferme les bois blancs, mous, légers, comme le pin, le sapin, le bouleau, le tremble, le peuplier, etc.

Les bois compacts ne brûlent que par la surface; la chaleur qui se propage dans l'intérieur en dégage les gaz combustibles qui brûlent en totalité dans les commencements, et il ne reste bientôt plus qu'un charbon volumineux, compact, se consumant lentement et sans flamme. Les bois légers brûlent avec rapidité, parce que leur porosité permet à l'air d'y pénétrer facilement, et qu'ils se déchirent sous l'action de la chaleur; la majeure partie du carbone qu'ils renferment brûlant en même temps que les gaz combustibles, ils laissent peu de charbon, et la flamme dure presque pendant toute la combustion. La différence dans la manière de se comporter à la combustion des bois durs et des bois légers diminue nécessairement à mesure que les bûches sont de moindres dimensions.

Dans les verreries, les fourneaux à porcelaine, et même les fours à poterie commune, où l'on a besoin d'une température très élevée et d'une flamme longue et continue, on emploie toujours des bois tendres; tandis que pour les usages où l'on a besoin d'une température beaucoup moins élevée et dans un lieu voisin du foyer, on préfère les bois durs.

Quel que soit d'ailleurs le bois qu'on emploie, l'effet calorifique est d'autant plus grand que le bois est plus divisé, parce qu'une moindre quantité d'air échappe à l'action du combustible. Mais indépendamment des frais qu'occasionnerait la refente du bois, souvent la nature de l'opération ne permet pas d'employer du bois trop menu, parce que la combustion serait trop rapide. Il n'y a que dans un petit nombre

d'usines, telles que certaines verreries et les fabriques de porcelaine, où la combustion rapide étant un avantage à cause de la température plus élevée qu'elle procure, on a recours au bois refendu.

Tableau du poids du mètre cube de différents bois, d'après M. Berthier.

DÉSIGNATION DES BOIS.	ÉTAT DES BOIS.	POIDS en kilogram.
Chêne de futaie des environs de Moulins.	Coupé depuis un an, en bûches refendues.	275
Id. *id.*	*Id.*, scié en quatre.	515
Chêne de la forêt de Monadier, près Moulins.	Gros bois coupé depuis trois ans, refendu.	386
Id. *id.*	*Id.*, scié en quatre.	485
Chêne des environs de Cahors. .	Coupé depuis un an.	525
Chêne de charbonnage.	Même, long de 30 pouces. . . .	220 à 262
Hêtre des environs de Moulins. .	En gros rondins refendus. . . .	400
Id. *id.*	Vermoulu en partie.	375
Bouleau des environs de Moulins.	En gros rondins.	440
Tremble.	De charbonnage.	190 à 220
Sapin de Moulins.	En gros bois.	300 à 340
Orme.	. . . .	320
Charme.	. . . .	398

A Paris, le bois de chauffage ordinaire pèse de 700 à 750 kilog. la voie, et celui de charbonnage de 600 à 700 kilog. La voie est de 2 stères ou 2 mètres cubes. Les bûches ayant $1^{m},14$ de longueur, la mesure employée dans les chantiers pour livrer le stère a 1 mètre de longueur sur $0^{m},88$ de hauteur. A Paris, le bois coûte environ 55 francs les 1 000 kilog.

Le tableau de la page 673 fait voir qu'au bout d'un certain temps le bois reprend une portion de l'eau qu'il avait d'abord perdue.

L'eau ne développant aucune chaleur, puisqu'elle n'est pas combustible, comme de plus elle en absorbe une quantité considérable en se vaporisant, on conçoit le grand avantage de ne brûler les bois que quand ils sont secs. C'est ce qui explique pourquoi dans plusieurs usines, telles que les verreries de verre fin et les fabriques de porcelaine, on ne se contente pas de bois aussi secs qu'ils peuvent l'être naturellement par la dessiccation à l'air, et qu'on les fait encore sécher dans des étuves (539).

Étendue forestière des principaux pays, en hectares: Russie d'Europe, 200 millions; États-Unis, 190 millions; Suède-Norvège, 25 millions 1/2; Autriche-Hongrie, 19 millions; Allemagne, 14 millions; Espagne, 8 millions 1/2; France, 9 millions; Italie, 3 millions 1/2; Roumanie, 2 millions; Angleterre, 1260000; Serbie, 1 million; Grèce, 850000; Suisse, 780000; Belgique, 489000; Portugal, 470000; Hollande, 230000; Danemark, 190000; Algérie, 3 millions.

La Suède et la Norvège sont les grands exportateurs des bois; l'Autriche vient après. Mais, dans tous ces pays, le déboisement fait des progrès considérables par suite du gaspillage de l'exploitation, et si les efforts tentés depuis quelques années pour combattre la pénurie des bois qui menace l'Europe, ne sont pas activement poussés, l'Europe sera obligée pour s'approvisionner de s'adresser à l'Australie et à l'Amérique.

Tableau des poids, des compositions en carbone et en hydrogène, et des puissances calorifiques du stère de différents bois secs, d'après les expériences de M. Chevandier.

NATURE DES BOIS.	Poids d'un stère de bois sec.	Charbon contenu dans un stère.	Hydrogène libre contenu dans un stère.	Puissance calorifique d'un stère.	Puissance calorifique relative.
	kilog.	kilog	kilog.		
Chêne à glands sessiles (bois de quartiers).	380	188,49	2,61	1 614 319	1,0000
Hêtre (bois de quartiers).	380	187,20	2,64	1 604 824	0,9941
Chêne, les deux variétés confondues (bois de quartiers).	371	184,02	2,55	1 576 101	0,9763
Charme (bois de quartiers).	370	179,73	2,28	1 532 082	0,9490
Chêne à glands pédonculés (bois de quartiers).	359	178,07	2,47	1 525 225	0,9448
Bouleau (bois de quartiers).	338	171,92	3,65	1 516 271	0,9392
Charme (quartiers et rondins mêlés). .	361	175,35	2,23	1 494 938	0,9260
Bouleau (quartiers et rondins mêlés). .	332	168,87	3,58	1 489 190	0,9224
Id. (rondinage de brins).	318	161,75	3,43	1 426 434	0,8836
Sapin, *id.*	312	158,89	2,94	1 386 376	0,8587
Chêne, les deux variétés confondues (rondinage de brins).	317	157,24	2,18	1 346 772	0,8342
Hêtre (rondinage de brins).	314	154,68	2,18	1 326 072	0,8214
Aulne (bois de quartiers).	293	149,52	2,98	1 311 993	0,8127
Aulne (quartiers et rondins mêlés). . .	291	148,50	2.96	1 303 054	0,8071
Charme (rondinage de brins).	313	152,04	1,94	1 296 432	0,8030
Hêtre (rondinage de branches).	304	149,76	2,11	1 283 870	0.7953
Sapin, *id.*	287	146,15	2,70	1 275 068	0,7898
Aulne (rondinage de brins).	283	144,41	2,88	1 267 217	0,7849
Pin, *id.*	283	144,66	2,63	1 260 600	0,7808
Pin (rondinage de branches).	281	143,63	2,61	1 251 581	0,7752
Charme, *id.*	298	144,75	1,84	1 234 029	0,7644
Sapin (bois de quartiers).	277	141,06	2,61	1 230 800	0,7624
Saule (quartiers et rondins mêlés). . . .	285	142,28	2,14	1 224 424	0,7584
Bouleau (rondinage de branches). . . .	269	136,82	2,90	1 206 536	0.7473
Saule (rondinage de brins).	276	137,79	2,07	1 185 698	0,7344
Tremble (quartiers et rondins mêlés, .	273	134,56	2,57	1 176 858	0,7290
Chêne, les deux variétés confondues (rondinage de branches).	277	137,40	1,90	1 176 671	0,7288
Pin (bois de quartiers).	256	130,86	2,38	1 140 375	0.7064

Tableau des quantités d'eau hygrométrique contenues dans 100 *de bois de différentes essences et de diverses qualités*, 6 *mois*, 1 *an*, 18 *mois et* 2 *ans après la coupe*, d'après M. Chevandier.

BOIS.	BOIS DE QUARTIERS.				RONDINAGE DE BRANCHES.				RONDINAGE DE BRINS.			
	6 mois.	1 an.	18 mois.	2 ans.	6 mois.	1 an.	18 mois	2 ans.	6 mois.	1 an.	18 mois.	2 ans.
Hêtre.	23,34	19,34	17,40	17,74	33.48	24.00	19,80	20,32	30,44	23,46	18,60	19,95
Chêne	29,63	23,75	20,74	19.16	31,20	26 90	24,55	21,09	32,71	26,74	23,35	20,28
Charme	24,68	20,18	18.77	17,94	31,38	25,89	22,33	19,30	27,19	23,08	20,60	18,59
Bouleau	23,28	18,10	15,98	17,17	37,34	28.99	24,12	21,78	39,72	29,01	22,73	19,52
Tremble	31,00	21,55	15,87	16,77	35,69	26,01	21,85	19,44	40,45	26,22	17.77	17,92
Aulne	22,37	19,17	15,27	16,72	»	»	»	»	42,43	24,09	19,06	18,05
Saule.	»	»	»	»	»	»	»	»	36,44	23,13	17,12	17,58
Sapin.	28,56	16,65	14,78	17,22	28,29	17,14	15,09	18,66	33,78	16,87	15,21	18,09
Pin.	29,31	28,54	15,81	17,96	35,30	17.59	15,72	17,39	41,49	18,67	15,63	17,42

512. Charbon de bois. Le charbon de bois donne moyennement 0,075 de cendres, et celui du commerce contient généralement de 10 à 12 p. 100 d'eau. Sauvage, ingénieur en chef des mines, donne pour la composition du charbon de bois fabriqué dans les forêts, 0,790 de carbone, 0,131 de matières volatiles et 0,079 de cendres.

D'après Sauvage, on peut admettre que la puissance calorifique du charbon de bois provenant des forêts est les 0,85 de celle du carbone pur, soit $8080 \times 0,85 = 6868$. Péclet admet 7000 pour la puissance calorifique des charbons de bois ordinaires, contenant 6 à 7 p. 100 d'eau et 6 à 7 de cendres (539).

Les valeurs relatives des divers charbons, sous le même volume, peuvent être considérées comme étant entre elles dans le rapport des poids du mètre cube de ces charbons.

D'après M. Berthier, dans les départements du Centre, le poids d'un mètre cube de charbon de chêne et de hêtre du commerce varie de 240 à 250 kilog.; celui de bouleau, de 220 à 230 kilog., et celui de pin, de 200 à 210 kilog. Dans les Vosges, celui de chêne et de hêtre, rondinage, est de 228 kilog., et celui du sapin 135 kilog. Dans les usines métallurgiques, dit d'Aubuisson, on admet généralement qu'un mètre cube de charbon en fragments de grosseur ordinaire pèse, pour le chêne et le hêtre, de 200 à 240 kilog.; pour le pin et le mélèze, de 160 à 180 kilog., et pour le sapin et le châtaignier domestique, de 130 à 150 kilog.

D'après Péclet, le pouvoir rayonnant du charbon de bois est à peu près moitié de sa chaleur spécifique, c'est-à-dire que la quantité de chaleur qu'il rayonne est à peu près égale à la chaleur qu'entraîne la fumée, ou moitié de la chaleur totale développée (page 668).

Par le mode de carbonisation en meules, employé dans les forêts, le bois ne donne que 17 à 18 p. 100 de son poids en charbon; pour les grandes meules, cette proportion est un peu dépassée. En volume, les petites meules rendent de 26 à 30 p. 100, et les grandes, de 30 à 35. Le bois distillé en vase clos rend de 28 à 30 p. 100 de son poids en charbon.

Dans les départements des Ardennes et de la Meuse, les meules contiennent de 60 à 90 stères de bois (1/4 de hêtre et chêne, 1/4 de tremble et saule, et 1/2 de charme) en bûchettes de $0^m,84$ à $0^m,90$ de longueur, et le rendement en poids est de 0,21 en moyenne. La carbonisation dure de 7 à 12 jours.

C'est vers l'âge de vingt ans qu'il convient d'aménager les bois destinés au charbonnage; on profite de la grande croissance du jeune âge, tout en obtenant le bois le plus convenable à la carbonisation (page 669).

A Paris, le charbon de bois coûte de 15 à 16 fr. les 100 kilog.

Les charbons de bois conservés longtemps deviennent friables, et donnent beaucoup de poussier dans leur transport; les charbons légers ont cet inconvénient à un plus haut degré que ceux provenant de bois compacts. On attribue cet effet à la cristallisation des sels que contiennent les charbons.

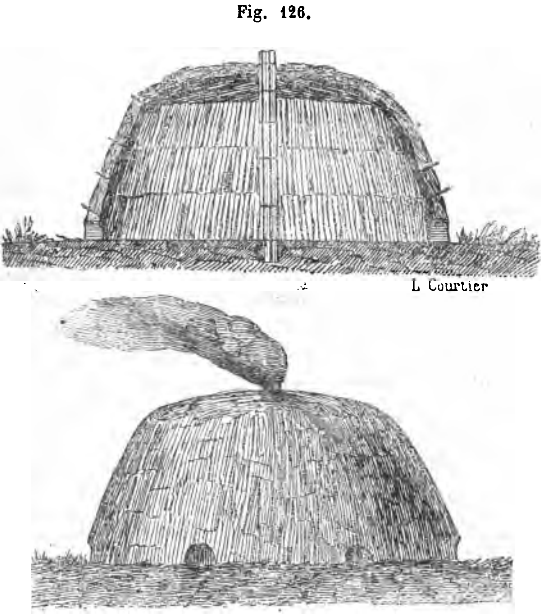
Pour le service des hauts fourneaux et des forges, on peut garder

les charbons en halle pendant sept à huit mois; au delà de ce terme, ils commencent à se détériorer sensiblement. Quand on est obligé de les conserver en tas exposés à l'air, on les abrite par des couvertures légères; mais ils perdent de leurs qualités s'ils y demeurent plusieurs mois. Cependant on a reconnu que les charbons récents sont moins avantageux qu'après un ou deux mois de séjour dans les halles.

Le charbon de bois peut absorber jusqu'à 12 p. 100 d'eau.

513. La carbonisation en meules, toujours suivie dans nos forêts,

Fig. 126.



remonte à une époque très reculée. Pour l'opérer, à proximité du bois qu'on exploite, on choisit un terrain ferme, uni et horizontal, qu'on nivelle par un transport de terre s'il est graveleux. Après avoir battu le sol à la dame sur toute l'étendue du cercle que doit occuper le fourneau, on place verticalement au centre quelques bûches autour desquelles on dispose par lits les bûchettes de bois à charbon. Ces bûchettes, qui ont ordinairement 0^{m},30 de longueur, se placent à peu près verticalement, en les serrant le plus possible les unes contre les autres. Une meule a de 2 à 3 mètres de hauteur, et on lui donne la forme d'un tronc de cône légèrement arrondi à sa partie supérieure. Quand la meule est élevée, on recouvre toute sa surface extérieure d'une couche de menus végétaux, de mousses ou feuilles, et ensuite d'une couche de *frasil*, mélange de terre et de poussier de charbon resté sur le sol après l'opération. Faute de frasil, on se sert de terre très divisée ou de gazon. Dans ce revêtement, qui doit avoir de 0^{m},12 à 0^{m},18 d'épaisseur, on ménage sur

le sol quelques ouvertures (*évents*) pour donner accès à l'air dans l'intérieur de la meule.

Le fourneau étant ainsi disposé, on peut le mettre au feu. Pour cela, on retire les bûches centrales, et dans l'espèce de cheminée qu'elles laissent on jette du bois sec très menu et des charbons incandescents. Le feu allumé ainsi étant tenu alimenté par du bois sec dont on tient la cheminée remplie, la combustion se propage rapidement, et bientôt il sort de la fumée, non seulement par la cheminée, mais encore par un grand nombre de points de la surface du fourneau. Aussitôt que la flamme commence à sortir par la cheminée, on ferme celle-ci en partie par une plaque de gazon, et après quelque temps on perce vers le sommet de l'enveloppe des évents pour donner issue aux produits de la carbonisation. Quand la fumée, qui se dégage d'abord noire, est devenue d'un bleu clair, presque transparente et peu abondante, on pratique dans l'enveloppe de nouveaux évents à $0^m,20$ ou $0^m,30$ au-dessous des premiers, qui doivent alors être bouchés. On continue ainsi de suite jusqu'au bas de la meule, en laissant constamment ouverts les évents réservés près du sol pour l'admission de l'air.

Pendant tout le temps que dure l'opération, le charbonnier doit observer le feu avec attention, afin de régler en conséquence l'entrée de l'air et l'issue de la fumée; il doit couvrir de terre les parties de la surface d'où la fumée se dégage en trop grande abondance, et ajouter de temps en temps de la terre au pied de la meule pour rétrécir progressivement les ouvertures d'accès de l'air extérieur dans le fourneau. Les vents peuvent avoir une influence tellement fâcheuse sur le résultat de la carbonisation, que souvent on est obligé d'en préserver les meules à l'aide d'abris, formés ordinairement d'un clayonnage en osier.

Le charbon est considéré comme fait à l'apparition du *grand feu*, c'est-à-dire quand, par suite de l'incandescence qui a pénétré toute la masse, l'enveloppe devient rouge. L'ouvrier jette alors de la terre humide sur le fourneau pour le recouvrir en totalité et arrêter la combustion; quelques heures après il renouvelle cette enveloppe; puis il attend que le charbon soit éteint, ce qui a lieu après vingt-quatre heures environ. Alors il enlève la terre, et sépare le charbon des parties mal carbonisées, appelées *fumerons*. Le charbon bien cuit est dur, compact, sonore et à cassure compacte; celui qui est trop cuit est tendre, friable et très peu sonore; il absorbe facilement l'humidité et brûle mal. Les fumerons ont une couleur terne; ils ont encore la résistance du bois, et ils donnent de la fumée en brûlant.

514 Distillation du bois. On l'introduit dans de grands cylindres, qui peuvent en contenir 5 stères et qui sont mis en communication avec des récipients destinés à recueillir les produits liquides de la distillation. On chauffe ordinairement avec du bois, et l'opération dure de sept à huit heures. Par ce procédé, 100 parties de bois en donnent 28 de charbon; mais comme on brûle 12,5 parties de bois pour la distillation, on n'obtient donc en définitive que 28 de charbon pour 112,5 de bois. En meules, ces 112,5 parties de bois ne donnent guère que 20 par-

ties de charbon, et, de plus, les produits liquides sont perdus. Cependant, comme les frais de main-d'œuvre sont bien moins considérables, la différence dans le rendement ne suffirait pas à couvrir les dépenses de distillation, si l'on ne recueillait pas les produits volatils (acides pyroligneux), dont le prix peut rendre, en définitive, le procédé de la distillation plus ou moins avantageux.

D'après M. Berthier, tous les bois non résineux, carbonisés dans les mêmes circonstances, rendraient, à poids égaux, la même quantité de charbon. M. Violette a obtenu, par 100 parties de bois desséchés préalablement à 150°, les rendements en charbon du tableau suivant, la carbonisation se faisant à 300°, dans des vases ouverts, à l'aide de la vapeur surchauffée :

Liège	62,80	Mélèze	40,31	Prunier	34,06
Saule pourri	52,17	Châtaignier	36,06	Érable	33,75
Paille de blé	46,99	Cerisier	35,53	Saule	33,74
Chêne	46,09	Tremble	34,87	Bourdaine	33,61
If	46,06	Pommier	34,69	Frêne	33,28
Bois de hêtre	44,25	Orme	34,59	Poirier	31,88
Pin maritime	41,48	Charme	34,44	Tilleul	31,85
Peuplier { feuilles	40,95	Aulne	34,40	Peuplier (tronc)	31,12
Peuplier { racines	40,90	Bouleau	34,17	Marronnier	30,86
Pin sauvage	40,75				

515 Charbon roux. MM. Honzeau et Fauveau, en carbonisant incomplètement du bois dans des caisses en fonte chauffées au moyen des gaz d'un haut fourneau, ont obtenu, pour une corde de bois pesant 375 à 380 kilog., 220 kilog. d'un charbon brun foncé, produisant autant d'effet que 117^k,7 de charbon ordinaire; le rendement apparent du bois est ainsi de 31 p. 100 de son poids en charbon ordinaire.

516. Emploi de la vapeur surchauffée à la carbonisation et à la dessiccation des bois, ainsi qu'à la cuisson du pain, du biscuit et de la viande, par M. Violette. Il s'agissait de trouver les conditions thermométriques ou de température nécessaires et suffisantes à la transformation du bois en charbon doué de qualités déterminées et exigées dans diverses branches d'industrie. 100 parties de bois donnent, selon le mode de carbonisation, 40 parties ou 15 parties seulement de charbon, et il est évident que les deux charbons ainsi obtenus doivent différer dans leur composition chimique et leurs propriétés caractéristiques.

Le premier de ces charbons, d'une couleur rousse très prononcée, contient deux fois plus de substances volatiles et moitié moins de carbone pur que le second, qui est très noir. Le premier est flexible, onctueux, moelleux au toucher; le second est raide, aigre, cassant. Le premier convient parfaitement, essentiellement à la fabrication de la poudre de chasse superfine, et il importait d'arriver à le produire à coup sûr, sans mélange d'autres charbons. Telle est la première difficulté vaincue par M. Violette.

Il a constaté d'abord qu'à la température de 200° le bois ne se carbonise pas; qu'à 250° on n'obtient qu'un charbon non cuit, autrement dit

des brûlots; qu'à 300° on forme le charbon *roux*, et qu'à 350° et au delà l'opération donne invariablement du charbon *noir*. Le temps nécessaire à la carbonisation varie d'ailleurs d'une demi-heure à trois heures; les produits passent progressivement et à volonté du charbon roux au charbon noir; le rendement enfin est d'autant moindre que la carbonisation est plus avancée.

On conçoit l'importance de ces premiers résultats, en se rappelant qu'on admettait que le bois ne se transformait en charbon qu'à la chaleur rouge (477), chaleur excessive si on la compare à la température de 250 ou 300°, démontrée suffisante par M. Violette.

C'est en faisant usage de la vapeur d'eau surchauffée qu'est produite la carbonisation. La vapeur est fournie par un générateur ordinaire; elle passe dans un serpentin contourné en hélice; elle en sort à une température déterminée, 300° par exemple, quand il s'agit de produire du charbon roux; elle enveloppe un cylindre horizontal qui renferme le bois; elle pénètre dans ce cylindre, échauffe le bois, opère sa carbonisation complète; elle sort enfin du cylindre chargée des produits de la distillation.

Par ce procédé, le rendement en charbon roux est de 39 p. 100, c'est-à-dire que la proportion de charbon qu'il s'agit de produire est deux fois plus grande; il y a plus, la poudre fabriquée avec le nouveau charbon présente une supériorité réelle, et, ce qui est mieux encore, le prix de revient du charbon et de la poudre diminue dans une notable proportion.

M. Violette est arrivé aussi à la cuisson du pain et du biscuit de mer à l'aide d'un courant de vapeur d'eau chauffée à 200°.

La vapeur d'eau surchauffée dessèche aussi avec rapidité, et il paraît que pour les bois de toute essence ce mode de dessiccation augmente la résistance à la rupture dans une très grande proportion, malgré la réduction notable de l'équarissage.

Il y a une température à laquelle correspond le maximum d'augmentation de résistance. Cette température est comprise entre 150 et 175° pour le bois d'orme, et entre 125 et 150° pour les autres bois. L'accroissement de résistance est de 2/3 pour le frêne, de 5/9 pour le chêne, de près de 1/2 pour le noyer, de 2/5 pour le sapin, et de plus de 1/3 pour l'orme.

517. Charbon de Paris. M. Popelin-Ducarre a eu, en 1846, l'idée de faire un mélange de poussier de charbon de bois et de goudron; de le mouler sous une forte pression en petits cylindres de 0^{m},10 de longueur sur 0^{m},03 de diamètre, et de faire prendre une grande dureté à ces cylindres en les soumettant à une haute température, dans des caisses ou cornues rectangulaires en briques chauffées fortement dans un four continu qui rappelle ceux des usines à gaz.

Ce charbon s'embrase assez facilement, et, une fois allumé, il continue à brûler lentement à l'air jusqu'à ce qu'il soit entièrement consumé, sans produire ni flamme ni fumée, ce qui le rend très convenable pour les usages domestiques. Il produit de 20 à 22 p. 100 de cendres,

et il s'en recouvre rapidement d'une couche pendant sa combustion. Il coûte de 14 à 16 francs les 100 kilog.

Le mélange se compose d'environ 50 kilog. de goudron d'usine à gaz pour 100 kilog. de charbon menu réduit en poudre sous des meules.

Les fours sont composés de cornues ou caisses rectangulaires en briques. Ces caisses sont disposées par rangs verticaux composés de trois, et chaque rang est séparé de son voisin par un intervalle libre de $0^m,15$ à $0^m,20$. Chaque intervalle est garni inférieurement d'un foyer qui sert à amener le four au rouge pour commencer l'opération; des ouvertures ménagées dans le haut des caisses y conduisent les gaz produits pendant la distillation. Ces gaz en se brûlant maintiennent le four à une température suffisante pour rendre l'opération continue, sans qu'il soit nécessaire de faire du feu sur les grilles.

Un moyen qui paraît avantageux pour agglomérer les charbons menus consiste à faire une pâte avec du poussier de charbon, du menu de houille grasse réduit en poudre fine et de l'eau; à mouler cette pâte, et soumettre les cylindres, préalablement desséchés, à une température suffisante pour réduire la houille en coke. De l'argile en proportion convenable agglomère d'une manière avantageuse les charbons menus (526).

518. Tannée. Péclet rapporte que 1250 kilog. d'écorce de chêne donnent 1000 kilog. de tannée sèche, qui ont à peu près la même puissance calorifique que 800 kilog. de bois, ou 300 kilog. de houille.

La puissance calorifique de la tannée parfaitement sèche est 3400, au lieu que celle de la tannée du commerce, qui renferme 0,30 d'eau, n'est que 2380 (508).

Une machine à basse pression de la force de 12 chevaux, établie dans un des faubourgs de Paris, consommait 12 kilog. de tannée par force de cheval et par heure.

A Paris, 1000 kilog. de tannée coûtent 10 fr.; la même quantité de bois 55 fr., et celle de houille, 60 fr. environ.

519. Tourbe. La tourbe séchée à l'air libre, comme on le fait ordinairement, contient 25, 30 et même quelquefois jusqu'à 80 p. 100 d'eau, qu'on ne peut lui faire perdre qu'en l'exposant à un courant d'air à la température de 50 ou 60°.

Tableau des compositions de quelques tourbes, d'après Regnault, et de leurs puissances calorifiques en prenant 8080 *pour celle du carbone, et* 34462 *pour celle de l'hydrogène.*

DÉSIGNATION DES TOURBES.	COMPOSITION.				HYDROGÈNE en excès.	PUISSANCE calorifique.
	Carbone.	Hydrogène.	Oxygène.	Cendres.		
De Vulcaire, près Abbeville. .	57,03	5,63	31,76	5,58	1,69	5191
De Long, près Abbeville . . .	58,09	5,93	31,37	4,61	2,04	5396
Du Champ-de-Feu, près Fromont.	57,79	6,11	30,97	5,33	2,30	5461

Les tourbes qui ont donné les résultats de ce tableau étant parfaitement sèches, on doit considérer ces résultats comme supérieurs à ceux fournis par les tourbes employées en industrie, qui contiennent 30 p. 100 d'eau après une longue exposition à l'air. En tenant compte de cette eau, les tourbes du tableau donneraient 3750 pour puissance calorifique moyenne, c'est-à-dire à peu près celle du bois parfaitement sec ou moitié de celle de la houille moyenne (508, 539); c'est ce que confirment les expériences en grand. On conçoit du reste qu'en raison de la composition si variable de la tourbe, il est impossible d'assigner une valeur générale à sa puissance calorifique; il y a des tourbes dont la puissance calorifique n'est que le 1/5 de celle de la houille. Pour quelques machines à vapeur chauffées à la tourbe, on a brûlé 12 kilog. de tourbe par force de cheval et par heure. Pour une même machine à haute pression de la force de 20 chevaux, M. Garnier a reconnu que pour obtenir le même effet il fallait brûler en poids deux fois plus de tourbe de seconde qualité que de houille.

Les tourbières les plus considérables de la France sont : 1° celles de la vallée de la Somme, entre Amiens et Abbeville; 2° celles des environs de Beauvais; 3° celles de la rivière d'Essonne, entre Corbeil et Villeroi.

520. Charbon de tourbe. Ce charbon étant très poreux, il brûle facilement, mais très lentement, à cause des cendres qu'il contient et qui s'accumulent à sa surface; des morceaux en ignition, séparés du foyer, continuent à brûler jusqu'à ce que tout le carbone ait disparu. Le charbon de bonnes tourbes contient de 0,14 à 0,18 de cendres.

On peut regarder la puissance calorifique du charbon de tourbe comme étant égale à celle du charbon qu'il contient; elle est donc très variable en raison de la quantité si diverse de cendres qui entre dans sa composition. Le charbon de tourbe d'Essonne donnant 18,2 p. 100 de cendres, il en résulte que sa puissance calorifique est de $8080 \times 0,818 = 6610$ (508).

La tourbe des Ardennes, carbonisée en grand dans des fours en maçonnerie, donne, d'après Sauvage, un produit de 44 p. 100 d'un charbon qui se compose de 0,43 de carbone, 0,32 de matières volatiles et combustibles, et 0,25 de cendres. On peut considérer 0,40 à 0,45 comme le rendement des tourbes en charbon. En meules, contenant ordinairement de 5,50 à 8,25 mètres cubes de tourbe, ce rendement en poids, rapporte M. Landrin, n'est que de 20 à 25 p. 100, et en volume, de 15 à 18.

521. Lignite, houille et anthracite. D'après la manière de se comporter au feu, les houilles se divisent en (527) :

1° *Houilles grasses maréchales, fondantes* ou *collantes* (caking coal). Ce sont les plus convenables pour la forge; la plus estimée est celle de Saint-Étienne, puis celle de Mons, dite de *fine-forge*. Elles sont d'un beau noir de velours et d'un aspect gras bien caractéristique. Au feu, elles éprouvent une espèce de fusion pâteuse, qui leur permet de résister au vent, en même temps qu'elles forment une espèce de voûte solide qui concentre la chaleur sur le fer. Sur les grilles, comme elles pro-

duisent une chaleur extrême, et que leur fusion pâteuse intercepte le passage de l'air, il en résulte que la grille est souvent brûlée et que le feu exige beaucoup de soin de la part du chauffeur.

Leur flamme est jaune vif.

2° *Houilles grasses et dures ou compactes* (cannel coal), qui sont moins fusibles au feu que les précédentes, et qui fournissent un coke plus dense, d'une grande cohésion et le meilleur pour les hauts fourneaux (page 700). Elles sont d'un noir gris. Elles proviennent surtout du Lancashire et d'Edimbourg.

3° *Houilles molles ou grasses à longue flamme* (cherry coal), qui sont encore moins collantes que les précédentes et qui conviennent parfaitement pour la fabrication du gaz d'éclairage; elles brûlent avec flamme et se consument rapidement avec forte chaleur. Leur coke est très boursouflé, et par suite très convenable pour les opérations métallurgiques. Elles sont très recherchées pour les grilles, et sous ce rapport on peut placer la houille de Mons, dite *flenu*, au premier rang.

Viennent ensuite celles de Newcastle, Glascow, Sunderland, Anzin; elles sont d'un noir de velours brillant, et fragiles.

4° *Houilles sèches à longue flamme, esquilleuses maigres* (splint coal), qui donnent un coke à peine fritté, dont les fragments n'ont souvent qu'une très faible consistance. On les emploie sur les grilles; leur flamme est longue, mais de peu de durée; elles produisent une chaleur moins intense que les houilles précédentes. Elles sont d'un brun noir brillant. Elles proviennent surtout de Wydam, Charleroi, Graissessac, Saint-Étienne.

5° *Houilles sèches à courte flamme*, qui ne donnent à la carbonisation qu'un produit pulvérulent, qui brûlent difficilement, et qu'on n'emploie guère que pour la cuisson des briques et de la chaux, pour la dessiccation du malt dans les brasseries et pour les usages domestiques.

Les *lignites* se présentent à l'état compact ou à l'état terreux. Dans le premier cas, ils ont la plus grande analogie avec la houille sèche, qu'ils remplacent pour la plupart des usages qui ne réclament pas les propriétés des houilles grasses sur les grilles, la cuisson de la chaux et des briques, le chauffage domestique; le jayet appartient à cette espèce. Leur température de combustion est peu élevée. Leur coke est pulvérulent. Les lignites terreux sont utilisés comme combustible, et il en est dont l'altération profonde leur a communiqué la structure schisteuse, et qui sont accompagés de pyrites qui les font employer dans d'importantes exploitations d'alun.

Pour qu'une houille soit bien convenable au chauffage des chaudières des machines à vapeur, il faut qu'elle soit faiblement pyriteuse, pour ne pas attaquer le métal de la chaudière, et que sa puissance calorifique ramenée à 0° soit d'environ 8400 calories.

Tableau de la composition de différents lignites, d'après les essais calorimétriques de Scheurer-Kestner et Meunier (510, 532). (*Annales de Physique et de Chimie*, 4e série, t. XXVI, année 1852.)

Voir la fin du tableau de la page 696, pour la composition et la chaleur de combustion de ces lignites, supposés sans cendres ni eau.

LIGNITES.	CARBONE.	HYDROGÈNE.	OXYGÈNE.	CENDRES.	EAU.
Lignite très gras de Bohême ou lignite-bitume (de Ellnbogen).	72,03	7,78	14,24	3,56	2,39
Lignite gras de Manosque (Basses-Alpes)	55,26	4,26	18,78	20,70	1,00
Lignite sec de Manosque.	56,68	4,15	24,65	6,70	7,82
Lignite sec du Rocher-Bleu, près Aix (Bouches-du-Rhône).	55,30	3,06	17,41	15,96	8,27
Bois fossile, passant au lignite (Bohême), ou bois bitumineux..	57,06	4,05	24,68	3,80	10,41
Bois bitumineux, autre échantillon. . .	57,72	3,89	23,78	4,01	10,60

Les *anthracites* brûlent difficilement, avec une flamme faible; à la calcination, les fragments ne se ramollissent pas. En Europe, on ne les emploie guère que pour la cuisson de la chaux et des briques. Les variétés qui ne décrépitent pas à la première impression du feu en se réduisant en petits fragments sont employés dans le pays de Galles pour les hauts fourneaux, et aux États-Unis d'Amérique on en fait une consommation immense pour les foyers domestiques et les chaudières.

Composition de quelques anthracites, d'après M. Jacquelin.

PROVENANCES.	CARBONE.	HYDROGÈNE.	OXYGÈNE	AZOTE.	CENDRES.
Swansea (Angleterre).	90,58	3,60	3,81	0,29	1,72
Sablé (Sarthe). . . .	87,22	2,49	1,08	2,31	6,90
Vizille (Isère).	94,09	1,85	0,31	1,85	1,90
Autre de l'Isère. . . .	94 »	1,49	0,03	0,58	4,00

Les anthracites de ce tableau brûlent sans flamme; celui de Vizille seul se divise en brûlant.

Les anthracites de Vicoigne, Fresnes et Vieux-Condé décrépitent par l'action de la chaleur, et tendent à passer à l'état de menu.

Production de la houille. L'Angleterre produit environ 175 millions de tonnes de houille et de lignite; les États-Unis, 130 millions de tonnes; l'Allemagne, 85 millions de tonnes (dont 67 millions 1/2 de houille et 17 millions 1/2 de lignite); la France, 26 millions 1/2 de tonnes (522); l'Autriche, 22 millions; la Belgique, 19 millions; la Russie, 5 millions de tonnes, etc.

522. Production des combustibles minéraux *par départements, en* **1890.**

DÉPARTEMENTS.	NATURE DU COMBUSTIBLE.	PRODUCTION en 1890.
		tonnes
Allier	Houille	1002523
Alpes (Basses-)	Lignite	32065
Alpes (Hautes-)	Anthracite	6630
Ardèche	Houille et anthracite	54207
	Lignite	»
Aveyron	Houille	979037
	Lignite	3039
Bouches-du-Rhône	Lignite	413913
Cantal	Houille	69090
	Lignite	245
Corrèze	Houille	3519
Côte-d'Or	Houille et anthracite	12413
Creuse	Houille	206533
Dordogne	Houille	37
	Lignite	103
Drôme	Lignite	98
Gard	Houille	2010424
	Lignite	19919
Hérault	Houille et anthracite	300193
	Lignite	454
Isère	Anthracite	145097
	Lignite	1150
Jura	Lignite	50
Loire	Houille et anthracite	3532152
Loire (Haute-)	Houille	209976
Loire-Inférieure	Anthracite	10942
Lot	Houille	2720
Maine-et-Loire	Anthracite	35020
Mayenne	Anthracite	58964
Nièvre	Houille	147089
Nord	Houille et anthracite	5201448
Pas-de-Calais	Houille	9096004
Puy-de-Dôme	Houille et anthracite	216278
Pyrénées-Orientales	Lignite	1801
Rhône	Houille	40760
Saône (Haute-)	Houille	202932
	Lignite	9126
Saône-et-Loire	Houille et anthracite	1714001
Sarthe	Anthracite	8950
Savoie	Anthracite	11054
Savoie (Haute-)	Anthracite	115
Sèvres (Deux-)	Houille	15548
Tarn	Houille	518250
Var	Houille	426
	Lignite	570
Vaucluse	Lignite	4632
Vendée	Houille	24621
Vosges	Lignite	2890
	Récapitulation.	
Houille et anthracite		25836953
Lignite		490055
Totaux		26327008

523. *Production des combustibles minéraux par bassin, en 1890 (chiffres provisoires).*

GROUPES GÉOGRAPHIQUES de bassins.	PRODUCTION en 1890	BASSINS ÉLÉMENTAIRES (1).	DÉPARTEMENTS où les bassins sont situés.	PRODUCTION en 1890.
	tonnes			tonnes
		I. — Houille et anthracite.		
Nord et Pas-de-Calais. .	14297452	Valenciennes	Pas-de-Calais, Nord. . .	14294176
		Le Boulonnais (Hardinghen)	Pas-de-Calais.	3276
Loire	3582896	Saint-Étienne et Rive-de-Gier	Loire, Rhône	3531401
		Sainte-Foy-l'Argentière.	Rhône.	40760
		Communay.	Isère	9984
		Le Roannais (Roanne). .	Loire, *Rhône*.	751
Gard.	2064631	Alais	Gard, Ardèche	2024181
		Aubenas.	Ardèche.	35578
		Le Vigan	Gard	4872
Bourgogne et Nivernais.	1922406	Creusot et Blanzy. . . .	Saône-et-Loire.	1548154
		Decize.	Nièvre.	147089
		Épinac et Aubigny-la-Ronce.	Saône-et-Loire, Côte-d'Or.	126331
		La Chapelle-sous-Dun. .	Saône-et-Loire	45815
		Bert	Allier	48903
		Sincey, *Forges*	Côte-d'Or, *Saône-et-Loire*.	6114
Tarn et Aveyron	1500007	Aubin.	Aveyron.	963239
		Carmaux	Tarn.	518250
		Rodez.	Aveyron.	15798
		Saint-Perdoux.	Lot	2720
Bourbonnais.	1113090	Commentry (et Doyet).	Allier	912599
		Saint-Éloy.	Puy-de-Dôme.	159470
		L'Aumance (Buxière-la-Grue)	Allier.	41021
		La Queune (Fins et Noyant)	*Allier*.	»
Auvergne.	335874	Brassac.	Haute-Loire, Puy-de-Dôme.	218274
		Champagnac et Bourg-Lastic.	Cantal, Puy-de-Dôme. .	105203
		Langeac.	Haute-Loire.	12397
Hérault	300193	Graissessac, *Roujan* . .	Hérault	300193
Creuse et Corrèze. . . .	210089	Ahun	Creuse.	196077
		Bourganeuf.	Creuse	10456
		Cublac (Terrasson), Meymac et Argentat . . .	Corrèze, Dordogne . . .	3556
Vosges méridionales . .	202932	Ronchamp.	Haute-Saône.	202932
Ouest	154045	Le Maine	Mayenne, Sarthe	67914
		Basse-Loire.	Loire-Inférieure, Maine-et-Loire.	45962
		Vouvant et Chantonnay.	Deux-Sèvres, Vendée . .	40169
		Saint-Pierre-la-Cour. .	*Mayenne*.	»
		Le Cotentin.	*Manche*.	»
Alpes occidentales. . . .	152167	Le Drac (La Mure) . . .	Isère.	134483
		Maurienne Tarantaise et Briançon	Hautes-Alpes, Savoie. .	17684
Totaux à reporter.	25835782	. . . .	. . . .	25835782

(1) Les bassins dont les mines n'ont pas été exploitées en 1890 et les départements correspondants ont leurs noms en *italiques*.

GROUPES GÉOGRAPHIQUES de bassins.	PRODUCTION en 1890.	BASSINS ÉLÉMENTAIRES.	DÉPARTEMENTS où les bassins sont situés.	PRODUCTION en 1890.
	tonnes			tonnes
Report......	25 835 782	....	....	25 835 782
Alpes occidentales (*suite*).	745	Oisans et *le Grésivaudan*..........	Isère...........	630
		Chablais et Faucigny. .	Haute-Savoie......	115
Maures.........	426	Les Maures (Fréjus) . .	Alpes-Maritimes, *Var*..	426
Pyrénées........	»	*Ibantelly, Durban et Ségure*........	*Basses-Pyrénées, Aude*.	»
Totaux pour les houilles.	25 836 953	....	....	25 836 953

II. — Lignite.

Provence........	446 548	Fuveau (Aix)......	Bouches-du-Rhône, *Var*	413 913
		Manosque........	Basses-Alpes, *Vaucluse*.	32 065
		La Cadière.......	Var...........	570
Comtat.........	23 572	Bagnols, Orange, *Banc-Rouge, Vagnas*...	Gard, Vaucluse, *Ardèche*..........	21 182
		Barjac et *Célas*.....	Gard...........	1 651
		Méthamis........	Vaucluse.........	739
		Montoulieu.......	*Hérault*.........	»
Vosges méridionales . .	12 016	Gouhenans, *Gémonval*.	Haute-Saône.......	9 126
		Norroy..........	Vosges..........	2 890
Sud-Ouest........	6 621	Millau et Trévezel....	Aveyron, Gard.....	4 018
		Estavar, Larquier, *Orignac, Saint-Lon*. .	Pyrénées-Orient., *Landes, Hautes-Pyrénées*.	1 801
		La Caunette.......	Hérault, *Aude*.....	454
		Murat..........	Cantal..........	245
		Simeyrols et la Chapelle-Péchaud.......	Dordogne........	103
Haut-Rhône.......	1 298	La-Tour-du-Pin.....	Isère..........	1 150
		Hauterives, *Montélimar*..........	Drôme..........	98
		Vercia, *Douvres*....	Jura, *Ain*........	50
		Entrevernes et Chambéry........	*Haute-Savoie, Savoie*.	»
Totaux pour les lignites.	490 055	....	....	490 055
Totaux généraux. .	26 327 008	....	....	26 327 008

En France, un des bassins houillers les plus remarquables est celui de la Loire, qui se divise en deux parties distinctes, ayant pour centre, l'une Saint-Étienne, et l'autre Rive-de-Gier. Ce bassin fournit deux variétés, dont l'une est de la houille grasse maréchale de 1re qualité, et dont l'autre, moins collante et plus solide, est très recherchée comme charbon de grille. Dans les mines de la Loire, la proportion de menu dépasse souvent les 2/3 de la quantité de houille extraite; on en vend une partie en cet état, et le reste est transformé en coke sur les lieux.

Le bassin houiller de Valenciennes est le prolongement du bassin belge de Mons. Les charbons d'Anzin sont gras, collants, en général peu sulfureux; ceux de Denain sont plus flambants, moins collants et meilleurs pour la grille. Les mines de Raismes fournissent un charbon de grille maigre; celles de Fresnes et du Vieux-Condé, un charbon sec anthraciteux. Le charbon d'Aniches est assez analogue à celui d'Anzin.

Alais, Decazeville, etc., produisent une grande quantité de houille consommée sur les lieux par les usines métallurgiques.

Le Creusot donne une houille propre à la fabrication du coke. A Monceau, qui

dépend de Blanzy, la houille est impropre à la fabrication du coke; elle n'est employée que comme charbon de grille. Lorsqu'on veut produire une forte chaleur, comme dans le puddlage de la fonte, il faut la mélanger avec des charbons gras comme ceux de la Loire.

Les mines de Decize, près de la Loire, fournissent un charbon flambant et sulfureux comme celui de Blanzy, mais plus collant et plus durable au feu.

Les mines de Fins, dans l'Allier, donnent du charbon de forge comparable à celui de Saint-Étienne; celles de Commentry, dans le même département, en fournissent un qui est de très bonne qualité et très propre à la fabrication du coke.

Épinac (Saône-et-Loire) fournit des charbons de grille très chauds, mais qui encrassent plus la grille que ceux de la Loire.

Les Alpes, le Maine et l'Anjou produisent une grande quantité d'anthracite employé à la cuisson de la chaux et de la brique.

Le Midi renferme beaucoup de lignites.

524. Classification commerciale des houilles. Dans le commerce, on distingue quatre sortes de houilles, d'après la grosseur des échantillons : 1° le *gros en roche* ou *pérat*, composé de blocs de 5 à 20 décimètres cubes; 2° la *gaillette;* 3° le *menu;* 4° le *tout-venant,* la houille telle qu'elle sort de la mine.

La gaillette se compose de morceaux gros à peu près comme les deux poings, que l'on sépare du menu en jetant la houille sur des claies. Le menu, qui traverse la claie, se divise quelquefois en *gailletin* de la grosseur d'une noix, en *tête de moineau*, et enfin en *fine* qui se subdivise *en fine menue* et en *fine poussier*.

La houille, telle qu'elle sort de la mine, est appelée *tout-venant*. C'est un excellent combustible; sa gaillette s'emploie pour allumer le foyer et activer le feu, et le menu en marche courante.

La houille ne contenant qu'environ 0,05 d'eau de mouillage, on peut l'acheter au poids. Quelquefois cependant les houilles du Midi contiennent plus d'eau.

Au moment de son extraction, la houille ne contient que 0,02 d'eau; mais dans le commerce, comme on n'a pas besoin de l'abriter, on conçoit qu'elle en renferme une quantité plus considérable.

A Paris, la gaillette, qui vient en général de Belgique (*Mons*, *Charleroi*), se vend de 50 à 55 francs la tonne de 1000 kilog. Le tout-venant s'y vend de 35 à 40 francs la tonne, et vient des houillères du Pas-de-Calais.

Le prix d'achat à la mine est de 22 francs la tonne pour la gaillette, et de 14 francs pour le tout-venant.

D'après l'examen du tableau page 688, on est conduit à admettre 8 000 pour la puissance calorifique d'une houille moyenne et de l'anthracite; c'est du reste la valeur que des expériences faites en grand semblent assigner à la puissance calorifique de ces combustibles (539). Quant aux lignites, la puissance calorifique n'est que de 6 500 (508).

Dans les foyers, la houille donne une quantité de cendres plus considérable qu'à l'analyse; cela est dû aux parcelles de coke qui tombent de la grille et qui échappent à la combustion. Voici les quantités de cendres recueillies dans le cendrier, à la manufacture des tabacs de Paris, en opérant sur plus de 600 kilog. de houille à l'état de *gaillette* :

Houille dite ancien Anzin	0,079
Id. de Newcastle (collante)	0,071
Id. de Denain (collante)	0,082
Id. dite nouvel Anzin (collante)	0,057
Id. de Decize (collante)	0,101
Id. des veines du Mathon et du Buisson (Belgique)	0,095
Id. dite Flenu, première qualité	0,095

Dans les cas ordinaires de la pratique, les houilles donnent dans le cendrier un résidu variant de 10 à 20 p. 100, 15 à 16 en moyenne.

La houille se vend à la voie, qui équivaut à 15 hectolitres ras ou à 12 hectolitres combles; c'est l'hectolitre comble qu'on emploie généralement dans les mines. Aujourd'hui, à Paris en particulier, la houille se vend au poids.

525. Le tableau **A** (p. 688) contient la composition de quelques combustibles minéraux, d'après les analyses de Regnault. Chaque échantillon, avant d'être analysé, a été soumis, pendant 30 minutes, à une température de 110 à 120°, ce qui lui fait éprouver une perte de poids qui a varié de 1,36 à 1,60 p. 100. La quantité d'azote étant toujours très faible dans les anthracites et n'étant que de 1,5 à 2 p. 100 dans les autres combustibles, on l'a confondu avec l'oxygène. Le coke est le résidu qu'a obtenu Regnault par la calcination en vase clos.

Le tableau suivant **B** contient également la composition de quelques combustibles minéraux, d'après les analyses de de Marsilly (*Annales des mines*, année 1857). Les échantillons, au lieu d'être desséchés à une température de 110 à 120°, ont été préalablement laissés pendant 12 à 24 heures dans le vide sec sous la cloche de la machine pneumatique, ce qui évitait l'influence d'une température élevée pendant la dessiccation. La proportion d'azote a été trouvée faible et à peu près celle indiquée par Regnault.

Nous avons ajouté à ces tableaux la puissance calorifique des combustibles, en prenant 8080 pour la puissance calorifique du carbone, et 34 462 pour celle de l'hydrogène en excès. L'eau étant composée, en poids, de 8 d'oxygène pour 1 d'hydrogène (536), pour l'anthracite de Pensylvanie, par exemple, l'hydrogène en excès est, pour 100 :

$$2,43 - \frac{1 \times 2,45}{8} = 2,12,$$

et la puissance calorifique de ce combustible est :

$$8080 \times 0,9045 + 34\,462 \times 0,0212 = 8039.$$

On voit que nous supposons, comme l'a fait Péclet, que l'oxygène et une partie de l'hydrogène se trouvent combinés à l'état d'eau dans les combustibles, et que par suite cette partie d'hydrogène ne produit pas de chaleur à la combustion. Cette hypothèse paraît rationnelle; mais aucune expérience directe n'a été faite pour vérifier son exactitude, et en supposant qu'elle soit vraie pour certains combustibles, rien ne prouve qu'elle le soit pour d'autres (527).

A. *Compositions de combustibles minéraux, d'après les analyses de Regnault.*

DÉSIGNATION DES COMBUSTIBLES.		DENSITÉ.	NATURE DU COKE.	POIDS du coke.	COMPOSITION.				HYDROGÈNE en excès.	PUISSANCE calorifique.
					Carbone.	Hydrogène.	Oxygène et azote.	Cendres.		
Combustibles de la formation carbonifère.										
Anthracites.	Pensylvanie.	1,462	Pulvérulent.	84,83	90,45	2,43	2,45	4,67	2,12	8039
	Pays de Galles.	1,348	Id.	89,72	92,56	3,33	2,53	1,58	3,01	8516
	Mayenne.	1,367	Id.	89,95	91,98	3,92	3,16	0,94	3,52	8645
	Rolduc (Prusse).	1,343	Id.	86,96	91,45	4,18	2,12	2,25	3,91	8737
Houilles grasses et dures.	Alais (Rochebelle).	1,322	Boursouflé.	76,29	89,27	4,85	4,47	1,41	4,29	8691
	Rive-de-Gier (P. Henry).	1,315	Id.	73,34	87,85	4,90	4,29	2,96	4,36	8601
Houilles grasses maréchales.	Rive-de-Gier, 1.	1,298	Très boursouflé.	66,72	87,45	5,14	5,63	1,78	4,44	8596
	(Grand' Croix), 2.	1,302	Id.	68,36	87,79	4,86	5,91	1,44	4,12	8513
	Newcastle (Richardson).	1,280	Id.	»	87,95	5,24	5,41	1,40	4,56	8678
Houilles grasses à longues flammes	Flenu de Mons, 1.	1,276	Boursouflé.	»	84,67	5,29	7,94	2,10	4,30	8323
	Id. 2.	1,292	Id.	»	83,87	5,42	7,03	3,68	4,54	8341
	Rive-de-Gier (Cimetière), 1.	1,288	Id.	67,33	82,04	5,27	9,12	3,57	4,13	8052
	Id. id. 2.	1,294	Id.	66,11	84,83	5,61	6,57	2,99	4,79	8505
	Id. (Couzon), 1.	1,298	Id.	61,88	82,58	5,59	9,11	2,72	4,45	8206
	Id. id. 2.	1,311	Id.	60,28	81,71	4,99	7,98	5,32	3,99	7977
	Lavaysse (Aveyron).	1,284	Id.	52,77	82,12	5,27	7,48	5,13	4,33	8128
	Lancashire (Canel-coal).	1,317	Id.	55,35	83,75	5,66	8,04	2,55	4,65	8369
	Epinac	1,353	Id.	59,97	81,12	5,10	11,25	2,53	3,69	7826
	Commentry.	1,319	Id.	63,16	82,72	5,29	11,75	0,24	3,82	8000
Houilles sèches à longues flammes	Blanzy.	1,362	Fritté.	54,72	76,48	5,23	16,01	0,28	3,23	7293
Combustibles des terrains secondaires.										
Anthracites.	Lamure (Isère).	1,362	Pulvérulent.	89,5	89,77	1,67	3,99	4,57	1,17	7657
	Macot (Tarantaise).	1,919	Id.	88,9	71,49	0,92	1,12	26,47	0,78	6045
Houille.	Obernkirchen (Wesphalie).	1,279	Très boursouflé.	77,8	89,50	4,83	4,67	1,00	4,25	8696
	Céral (Aveyron).	1,294	Fritté.	53,3	75,38	4,74	9,02	1,86	3,61	7335
	Noroy.	1,410	Pulvérulent.	51,2	63,28	4,35	13,17	19,20	2,70	6043
Jayet.	Saint-Girons (Ariége).	1,316	Fritté.	42,5	72,94	5,45	17,53	4,08	3,26	7017
	Béleitat.	1,305	Id.	42,0	75,41	5,79	17,91	0,89	3,55	7317
Combustibles des terrains tertiaires.										
Lignite parfait.	Dax.	1,272	Pulvérulent.	49,1	70,49	5,59	18,93	4,99	3,22	6805
	Bouches-du-Rhône.	1,254	Id.	41,1	63,88	4,58	18,11	13,43	2,32	5961
	Mont-Meisner (Hesse-Cassel).	1,351	Id.	48,5	71,71	4,85	21,67	1,77	2,14	6532
	Basses-Alpes.	1,276	Id.	49,5	70,02	5,20	21,77	3,01	2,43	6512
Lignite imparfait.	Alphée (Grèce).	1,185	Analogue au charbon de bois.	38,9	61,20	5,00	21,78	9,02	1,90	5600
	Cologne.	1,100		36,1	63,29	4,98	26,24	5,49	1,70	5700
	Usnach (bois fossile).	1,167		»	56,04	5,70	36,07	2,19	1,19	4938
Lignite passant au bitume.	Ellebogen (Bohême).	1,157	Boursouflé.	27,4	73,79	7,46	13,79	4,96	5,74	7940
	Cuba.	1,197	Id.	39,0	75,85	7,25	12,96	3,04	5,63	8069
Asphalte.	»	1,063	Id.	9,0	79,18	9,30	8,72	2,80	8,21	9227

Désignation des combustibles.		Densité.	Coke obtenu en vase clos. Nature.	Poids	Composition. Carbone.	Hydrogène.	Oxygène et azote.	Cendres.	Hydrogène en excès.	Puissance calorifique.
	Bassin de Mons.									
	Haut-flenu.	1,258	Fritté.	63,58	82,95	5,42	10,93	0,70	4,05	8098
	Belle-et-Bonne. Petite-Cossette, fosse n° 21.	»	*Id.*	63,00	80,03	5,50	9,37	5,10	4,33	7959
Houilles flenu sèches.	Belle-et-Bonne. Grande-Houbarte, fosse n° 21.	»	*Id.*	64,76	82,41	5,60	10,89	1,10	4,24	8120
	Levant du flenu.	1,293	*Id.*	66,96	82,91	5,22	10,13	1,74	3,95	8060
	Couchant du flenu.	»	*Id.*	65,48	81,73	5,38	9,77	3,12	4,16	8037
	Midi du flenu, maigre.	»	*Id.*	66,02	79,96	4,92	8,89	6,23	3,81	7774
	Midi du flenu demi-gras.	»	*Id.*	65,74	83,38	5,12	9,70	1,80	3,91	8085
	Grand-Hornu.	»	Bien formé.	68,31	83,30	5,63	8,54	2,53	4,56	8302
Houilles flenu grasses.	Nord du bois de Boussu. Grand-Gaillet-Sentinelle.	»	*Id.*	68,16	82,25	5,34	9,51	2,90	4,15	8076
	Nord du bois de Boussu. Fosse Alliance.	»	*Id.*	69,15	80,55	5,53	9,52	4,40	4,34	8004
	Grand-Buisson.	1,255	*Id.*	70,10	83,40	5,40	7,76	3,44	4,43	8265
	Escouffiaux.	»	*Id.*	72,90	85,10	5,49	7,25	2,16	4,58	8454
Houilles dures.	Baron-de-Mecklenbourg.	»	*Id.*	72,65	83,17	5,13	6,99	4,80	4,26	8182
	Sainte-Hortense; bonne veine.	1,272	*Id.*	75,17	85,11	5,35	7,61	1,93	4,40	8393
	Ferrand.	»	*Id.*	74,71	86,13	4,60	7,92	1,35	3,61	8203
	Elonges.	»	*Id.*	74,86	86,69	5,04	6,86	1,41	4,18	8445
	Agrappe; veine 5 paumes.	1,261	*Id.*	78,81	86,68	4,78	6,10	2,44	4,02	8389
Houilles fines forges.	Agrappe; veine grande-céreuse.	»	*Id.*	80,33	85,30	4,87	6,49	3,34	4,06	8291
	Bellevue; fosse n° 8.	1,275 1,240	*Id.*	80,58	86,38	4,48	6,09	3,05	3,62	8227
	Jolimet et Roinge.	»	*Id.*	80,51	88,85	4,87	4,46	1,82	4,31	8664
	Bassin du Centre (Mons).									
	Haine-Saint-Pierre.	»	Bien formé, très boursouflé.	81,63	85,82	4,49	7,29	2,40	3,58	8168
	Bois-du-Luc.	1,255	Boursouflé.	78,80	82,73	4,64	7,13	5,50	3,75	7977
	Sars-Longchamps.	»	Bien formé et boursouflé.	81,61	84,61	4,52	6,58	4,29	3,70	8112
Houilles grasses.	La Louvière.	»	Boursouflé.	80,04	86,44	4,64	4,12	4,80	4,12	8404
	Bracquegnies.	»	Formé, très boursouflé.	80,22	88,40	4,69	5,21	1,70	4,04	8535
	Mariemont.	1,298	Bien formé, boursouflé.	81,05	87,36	4,68	5,68	2,28	3,97	8427
	Houssu.	»	Un peu boursouflé.	83,90	86,40	4,56	4,56	6,82	3,99	8356
	Haine-Saint-Pierre.	»	Bien formé, à peine bours.	82,64	83,40	4,43	5,84	6,33	3,70	8014
	Bois-du-Luc.	»	Formé, légèrement bours.	77,60	88,12	4,48	5,70	1,70	3,77	8419
	Barcoup.	»	Bien formé, non boursouflé.	82,45	87,26	4,28	5,56	2,90	3,58	8284
Houilles demi-grasses.	Sars-Longchamps.	»	A peine formé, non bours.	80,51	87,02	4,43	6,57	1,98	3,61	8275
	Mariemont.	1,309	Formé, non boursouflé.	83,70	88,62	4,31	4,77	2,30	3,71	8439
	Mariemont.	»	Formé, un peu mieux agglutiné.	84,66	84,76	4,57	5,61	5,49	3,87	8182

Suite du tableau B.

Désignation des combustibles.		Densité.	Coke obtenu en vase clos. Nature.	Poids	Composition. Carbone.	Hydrogène.	Oxygène et azote.	Cendres.	Hydrogène en excès.	Puissance calorifique.
Houilles demi-grasses (*suite*).	La Louvière	»	Formé, non boursouflé	82,73	83,27	4,57	5,70	6,47	3,86	8058
	Bracquegnies	»	Formé, non boursouflé	84,79	90,46	4,30	4,34	0,90	3,76	8605
	Houssu	»	A peine formé	83,50	87,47	4,85	4,72	2,96	4,26	8536
	Barcoup	»	*Id.*	82,97	87,75	4,20	5,45	2,60	3,52	8303
Bassin de Charleroy.										
Houilles grasses	Saint-Martin; fosse n° 3, veine Bavette	»	Bien formé, boursouflé	79,48	86,23	4,62	5,81	3,34	3,89	8308
	Trienkarsin; fosse n° 6, veine 10 paumes	»	*Id.*	84,43	86,47	4,68	5,30	3,55	4,02	8372
	Poirier; fosse Saint-Louis	1,278	*Id.*	83,60	83,21	4,47	5,80	6,52	3,74	8012
Houilles demi-grasses	Bayemont; fosse Saint-Charles	1,296	Bien formé	85,75	80,64	4,06	5,67	9,63	3,35	7670
	Trienkarsin; fosse n° 4, Sébastopol	»	A peine formé, non bours.	89,40	88,64	4,06	4,36	2,94	3,51	8373
	Sacré-Madame; veine Petite-Sablonnière	»	*Id.*	87,55	88,34	4,37	4,52	2,77	3,80	8447
	Lodelinsart; fosse n° 7	»	*Id.*	87,02	86,29	4,26	4,41	5,04	3,71	8251
	Sars-lès-Moulins; fosse n° 7	»	*Id.*	85,57	88,69	4,25	5,26	1,80	3,59	8403
	Ardenoises; fosse Feignat, veine Engins	»	*Id.*	86,66	86,02	4,03	4,74	5,21	3,44	8136
	Carabinier-Français; veine 8 paum.	»	*Id.*	88,50	83,90	3,85	5,58	6,58	3,15	7865
	Carabinier-Français; fosse n° 2, veine 11 paumes	»	*Id.*	88,15	87,85	4,13	5,53	2,49	3,44	8284
	Gouffre; fosse n° 3, veine Gros-Pierre	1,031	*Id.*	88,15	83,94	3,87	6,20	5,99	3,09	7847
Houilles maigres	Roton; veine Greffier	»	Non formé ou en partie seulement. Le résidu est en poussière ou tombe en poussière au moindre choc.	87,17	84,50	3,90	5,10	6,50	3,26	7951
	Pont-du-Loup; veine nord	»		89,82	89,12	3,90	5,61	1,37	3,20	8304
	Falnuée; Grande-Veine	1,274		88,90	89,30	3,97	5,13	1,60	3,33	8363
	Beaulet; fosse n° 1, veine des Haies	»		91,86	90,89	3,65	3,98	1,48	3,15	8430
	Bois d'Heigne; fosse n° 1, veine des Haies	1,031		91,35	89,22	3,83	4,52	2,43	3,26	8332
Bassin de Valenciennes.										
Houilles grasses à longues flammes. Division de Denain.	Fosse Renard; veine Marck	1,274	Bien formé, très boursouflé.	66,68	82,55	5,47	7,68	4,30	4,51	8224
	— Renard; — Président	»	*Id.*	67.35	85,54	5,46	7,50	1,50	4,52	8469
	— Renard; — Marie	»	*Id.*	67,50	86,39	5,32	6,99	1,30	4,45	8514
	— Renard; — Paul	»	*Id.*	69,62	85,68	5,21	7,21	1,90	4,31	8408
	— Orléans; Grande-veine	»	*Id.*	68,82	83,28	5,23	8,09	3,40	4,22	8183
	— Napoléon; veine Périer	»	*Id.*	67,75	84,84	5,53	6,83	2,80	4,68	8468
	— Napoléon; — Marie-Louise	»	*Id.*	70,28	87,10	5,18	6,82	0,90	4,33	8530
	— Mathilde; — Zoé	»	*Id.*	69,09	81,12	5,07	8,11	5,70	4,06	7954
	— Ernestine	[illegible]	*Id.*	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	4,80	4,34	[illegible]

Houilles grasses à longues flammes	Division de Denain.	Fosse Jean-Bart; veine Edouard.	»	*Id.*	72,07	83,85	4,93	7,22	4,00	4,03	8164
		— Lebret; nouvelle veine.	»	*Id.*	72,83	86,34	4,95	6,81	1,90	4,10	8389
		— Lebret; 2ᵉ nouvelle veine.	»	*Id.*	74,56	87,05	4,91	5,04	3,00	4,28	8509
	Division de Saint-Waast	— Davy; veine Curochon.	»	*Id.*	71,90	81,10	4,54	7,80	6,50	3,56	7780
		— du Temple; veine Taffin.	»	*Id.*	72,10	85,95	5,24	6,31	2,50	4,45	8478
Houilles grasses maréchales à courte flamme	Division de Saint-Waast	Fosse de la Réussite.	1,270	Bien formé.	75,91	85,90	5,03	6,57	2,50	4,21	8392
		Grosse-Fosse.	1,249	*Id.*	77,55	86,47	4,90	5,53	3,10	4,21	8438
		Fosse Tinchon.	»	*Id.*	78,08	86,73	4,68	5,59	3,00	3,98	8379
		— Ernest; veine nᵒ 19.	»	*Id.*	78,90	86,15	4,78	5,97	3,10	4,03	8350
Houilles demi-grasses.	Division de Saint-Waast	— du Temple, 1ʳᵉ veine du nord	»	Formé, peu boursouflé.	81,58	85,98	4,61	4,91	4,50	4,00	8326
		Grosse-Fosse.	»	Formé, à peine boursouflé.	85,80	88,95	4,41	3,84	2,80	3,93	8542
	Division d'Anzin.	Fosse Chauffour; grande veine.	1,261	*Id.*	80,74	83,50	4,35	6,35	5,80	3,56	7974
		— la Cave; veine Rosiers.	1,311	Boursouflé, houille grasse.	75,42	82,98	4,81	6,51	5,70	4,00	8083
		— Bleut-Borne; veine Georges.	»	Non boursouflé.	85,73	87,89	4,50	4,81	2,80	3,90	8446
		— Saint-Louis; — Deludie.	»	*Id.*	86,15	89,53	4,43	4,54	1,50	3,86	8554
		— Moulin; veine nord.	»	*Id.*	87,33	88,03	4,15	4,32	3,50	3,61	8357
Houilles maigres.	Vieux-Condé	— Sarteau; — 6 paumes.	»	Non formé.	92,28	91,16	3,83	3,61	1,40	3,38	8531
		— Vieille-Machine; veine à sillon	1,393	*Id.*	92,23	86,39	3,51	4,20	5,90	2,98	8008
	Fresne.	— Bonnepart; veine Toussaint.	1,352	*Id.*	93,17	90,54	3,66	2,70	3,10	3,32	8460
		— Bonnepart; grande-veine.	1,325	*Id.*	89,95	86,47	3,49	3,84	6,20	3,01	8024
	Bassin du Pas-de-Calais.										
Bruai.			»	Boursouflé.	62,49	79,86	5,56	12,38	2,20	4,01	7835
Marles.			»	*Id.*	62,77	79,64	5,56	11,00	3,80	4,18	7875
Bully.			»	*Id.*	65,09	83,34	5,82	7,84	3,00	4,84	8400
Billy-Montigny.			1,257	Bien formé.	68,16	85,36	5,81	7,53	1,60	4,87	8575
Hersin, gras.			1,258	*Id.*	71,55	87,00	5,18	6,62	1,20	4,35	8529
Lens.			»	*Id.*	76,85	85,68	5,31	6,41	2,60	4,51	8477
Naux, gras.			1,268	*Id.*	77,05	86,78	4,98	5,84	2,40	4,25	8476
Henin-Liétard, gras.			1,269	Boursouflé, bien formé.	77,64	86,34	5,40	5,86	2,40	4,67	8586
Gayant.			»	*Id.*	82,49	86,89	4,86	5,65	2,60	4,15	8451
Escarpelle.			»	Non formé.	89,56	90,75	4,00	3,58	1,80	3,55	1556
Courrières, maigre.			1,348	En poussière.	87,62	82,68	4,18	4,54	8,60	3,61	7925
	Houilles d'Angleterre.										
Hartley.			1,254	Léger, peu boursouflé.	61,54	78,35	5,55	14,60	1,50	3,72	7613
Hunwich.			1,270	Bien formé, boursouflé.	71,34	86,80	5,51	5,86	1,83	4,78	8661
Byers Green.			1,266	*Id.*	72,10	85,27	5,24	8,49	1,48	4,18	8330
Anthracite du pays de Galles.			1,396	Non formé.	92,27	92,66	3,08	2,66	1,60	2,75	8435
	Tourbes.										
De Bresles, noire, 1ʳᵉ qualité.			1,070	»	38,62	47,78	7,16	36,06	9,00	2,65	4774
— mousseuse, 2ᵉ qualité.			0,839	»	39,43	46,80	5,65	41,15	6,40	0,51	3957
Tourbe noire de Thésy, 1ʳᵉ qualité.			0,946	»	36,95	50,67	5,76	36,87	6,70	1,15	4490
— — mousseuse, 2ᵉ qualité.			0,388	»	40,04	43,65	5,79	36,66	14,00	1,21	3944
Tourbe noire de Bourdon, 1ʳᵉ qualité.			1,147	»	37,85	47,69	6,01	39,30	7,00	1,10	4232
Tourbe noire de Camon, 1ʳᵉ qualité.			1,189	»	38,11	46,11	5,99	38,50	9,40	1,18	4132
Tourbe blanche de Remiencourt.			0,904	»	72,57	12,99	2,22	19,71	65,08	0,00	1050

La puissance calorifique, c'est-à-dire la chaleur développée par la combustion du carbone et de l'hydrogène, est absorbée par la chaleur latente due au passage à l'état gazeux des parties solides et des parties liquides qui composent le combustible, et par l'échauffement des produits de la combustion.

Lorsque la fumée est complètement refroidie, la vapeur d'eau se condensant, on utilise toute la puissance calorifique du combustible, à l'exception de la chaleur latente due à la gazéification du carbone, qui est toujours perdue; mais si la fumée se dégage à plus de 100°, comme cela a lieu ordinairement dans l'industrie, on perd encore, en outre de la chaleur que renferme la fumée, la chaleur latente de la vapeur d'eau.

Poids moyen de l'hectolitre ras de houille de diverses provenances.

Houille de la mine de Labarthe	88 kilog.
Id. d'Auvergne et de Blanzy	87
Id. de la mine de Combelle	86
Id. de la mine de Lataupe	85
Id. de la mine de Saint-Étienne	84
Id. de Decize	83
Id. de Mons	80
Id. du Creusot	79

On peut estimer que le poids de l'hectolitre de houille est moyennement de 80 kilog., et qu'il varie de 75 à 88 kilog.

On adopte 90 kilog. comme étant le poids de l'hectolitre d'anthracite.

526. Lavage et agglomération de la houille. Depuis quelques années, dans un grand nombre de bassins houillers, par un lavage, on est parvenu à priver la houille de la majeure partie des schistes, pyrites et matières terreuses qui s'y trouvent mélangés lors de l'extraction, et à obtenir ainsi une houille plus convenable principalement pour la fabrication du coke destiné à la métallurgie et surtout au chauffage des locomotives.

Le lavage de la houille s'effectue par deux méthodes différentes. Dans la première on se sert d'une caisse en bois partagée en deux parties inégales par une cloison verticale qui ne descend pas jusqu'au fond de la caisse; la plus petite renferme un piston, la plus grande deux grilles horizontales plus ou moins rapprochées; la grille supérieure est formée de barreaux espacés de $0^m,01$; l'autre est ordinairement une plaque de cuivre percée de petits trous très rapprochés. La caisse étant remplie d'eau, on verse la houille dans le grand compartiment, et par les mouvements du piston l'eau monte et descend à travers la couche de combustible, en amenant à la partie inférieure, sur la plaque de cuivre, les parties les plus denses, c'est-à-dire les fragments de schiste. Lorsque le dépôt atteint la grille supérieure, on enlève le charbon qui se trouve au-dessus.

Dans la seconde méthode, l'opération est continue; l'appareil se compose d'une caisse longue, peu profonde, dont le fond est légèrement incliné, et qui est garnie d'un certain nombre de cloisons transversales

de même hauteur. De l'eau s'écoule constamment dans la longueur de la caisse ; on verse de la houille menue en amont, les fragments les plus denses se déposent dans les premiers compartiments, et les plus légers dans les derniers (*Bulletin de la Société d'encouragement*, t. XLIX).

M. Marsais, ingénieur, directeur des mines de Saint-Étienne, moule la houille menue, et même on le fait avec avantage et sur une très grande échelle dans presque tous les lieux d'exploitation.

A Blanzy, on commence par laver la houille menue dans une caisse à double fond; on retire la houille lavée pour la mettre en tas et la laisser égoutter; alors, on la concasse en grains plus petits et à peu près uniformes, en la faisant passer entre deux cylindres cannelés. La houille étant ainsi préparée, on la dessèche à 200° dans des fours, et on l'imprègne à chaud de 7 à 8 p. 100 de brai (goudron de houille concentré), qu'on rend liquide en l'échauffant et qu'on fait arriver dans le four. Le mélange étant opéré dans le four, on retire la matière, que l'on place dans des moules en fonte à angles arrondis de $0^m,32$ de longueur, $0^m,16$ de largeur et $0^m,16$ de profondeur, où on la comprime sous une pression de 20000 kilog. Les *péras* prennent ainsi une grande dureté, qui s'accroît encore par le refroidissement au point de devenir plus grande que pour les péras naturels.

Ces péras artificiels conviennent surtout pour les bateaux, où ils font gagner 0,2 d'espace dans les soutes; de plus, ils se transportent aisément sans déchet sensible, et ils se conservent plusieurs années sans altération. Au moment de les utiliser, on les brise, et leurs fragments anguleux fournissent un combustible qui brûle dans de bonnes conditions, en donnant au moins autant de chaleur que la houille.

Quand la houille menue est grasse, pour l'agglomérer, il suffit d'en remplir des moules en fonte formés de manière qu'ils ne laissent échapper que les gaz et de soumettre ces moules à l'action d'un four chauffé à 500°, pendant un temps qui peut varier de une demi-heure à 3 heures, suivant la qualité de la houille. A la chaleur, la houille éprouve une espèce de fusion pâteuse, et, tendant à se gonfler, elle se trouve fortement comprimée dans les moules, et reste en pains après le refroidissement. Ce procédé est aussi employé pour des menus de houille sèche, en leur mêlant une proportion convenable de menus de houille grasse.

Avant la mise en pratique des moyens précédents d'agglomération, la houille menue n'était employée qu'à la fabrication du coke, et à celle des briquettes, pains de pâte de houille et de 1/15 d'argile, dont on se sert pour le chauffage domestique; aussi, à cause de la difficulté de la brûler sur les grilles, restait-elle dans les mines en masses énormes très encombrantes, et n'avait-elle qu'une faible valeur; ainsi, à Saint-Étienne, le gros charbon se vendant 2 fr. les 100 kilog. et la gaillette $1^f,25$, le menu ne valait que $0^f,25$ à $0^f,50$. La proportion de menu est environ moitié de la quantité totale de houille exploitée.

527. Pouvoir calorifique et classification des houilles (508, 521), par Gruner (*Annales des mines*, 1873). La valeur réelle d'une houille

dépend de son *pouvoir calorifique* et d'un certain nombre de propriétés accessoires, parmi lesquelles il convient de citer : la *cohésion* ou *friabilité* (propriété de résister plus ou moins aux chocs sans se réduire en menu, et que l'on mesure en mettant dans un tonneau en bois, pouvant tourner autour de son axe horizontal, 100 morceaux de houille du poids uniforme d'environ 500 grammes chaque. Après 50 tours d'une vitesse donnée, on crible le contenu et mesure la proportion de gros qui reste. La marine française a essayé la cohésion de la houille par ce procédé), la proportion ainsi que la nature chimique des cendres, et surtout le *pouvoir agglomérant*, c'est-à-dire la propriété grâce à laquelle le combustible se ramollit partiellement sous l'action de la chaleur, et peut même subir une véritable fusion.

Toute classification sérieuse et rationnelle des houilles devrait être basée sur l'*ensemble* de ces propriétés. Malheureusement, on ne connaissait encore, jusque dans ces derniers temps, que d'une façon assez imparfaite le pouvoir calorifique réel des houilles.

On a cru pouvoir y suppléer par l'analyse élémentaire. Dulong a proposé la formule :

$$P = 8080C + 34462\left(H - \frac{O}{8}\right)$$

P pouvoir calorifique cherché;
C poids du carbone;
$\left(H - \frac{O}{8}\right)$ poids de l'hydrogène *libre*, c'est-à-dire de l'hydrogène *total* H, moins celui que l'on suppose déjà brûlé en *eau* par l'oxygène O que renferme la houille.

Sans doute Dulong n'attribuait à cette formule qu'une sorte de valeur industrielle. Il savait fort bien que l'on ne pouvait, au point de vue calorifique, assimiler une combinaison chimique ternaire à un simple mélange de carbone et d'hydrogène simplement combiné à l'oxygène. Mais on croyait, au moins à cette époque, que le carbone et l'hydrogène, considérés comme corps simples, possédaient toujours le même pouvoir calorifique. On ignorait alors l'influence de la constitution moléculaire sur la caloricité des corps; on ne savait pas que la chaleur de combustion d'un corps, simple ou composé, est en général d'autant plus consiérable que la condensation moléculaire est moins avancée. Or il est établi aujourd'hui, par les travaux de Favre et Silbermann, Regnault, Berthelot et autres, que la chaleur de combustion, comme les chaleurs spécifiques, varie avec la densité.

Il suit de là que pour pouvoir appliquer la formule de Dulong aux houilles, il faudrait substituer au pouvoir calorifique de l'hydrogène *gazeux* celui de l'hydrogène *solidifié*, et à la place du chiffre 8080, qui représente la chaleur de combustion d'un carbone dont la densité réelle est, d'après M. Violette, supérieure à *deux*, un nombre plus élevé correspondant à la *moindre* condensation du carbone dans les houilles.

Le procédé proposé par Berthier ne conduit pas plus que la formule de Dulong au pouvoir calorifique réel des combustibles. Ce procédé

suppose, en effet, que la chaleur produite est proportionnelle à l'oxygène consommé, hypothèse qui fait également abstraction de l'état de condensation plus ou moins avancé des éléments combustibles.

Toute chaleur dégagée par le fait de la condensation est irrévocablement perdue pour l'acte de la combustion. Or les houilles sont des composés ternaires *diversement* condensés, et c'est là ce qui fait que la simple analyse *élémentaire*, qui n'apprend rien sur le *mode* de combinaison, ne peut rien apprendre non plus sur leur pouvoir calorifique, et ne peut ainsi servir à apprécier leur valeur industrielle.

Il est aujourd'hui certain que la composition *élémentaire* des houilles ne s'accorde pas toujours avec leurs propriétés essentielles, c'est-à-dire avec leurs pouvoirs *agglomérant* et *calorifique*. Ce désaccord vient, en effet, de se manifester, d'une façon très frappante, par la détermination directe du pouvoir calorifique de certaines houilles, détermination que l'on doit à MM. Scheurer-Kestner et Ch. Meunier, de Mulhouse (*Annales de physique et de chimie*, 4e série, t. XXI et XXVI). Ces recherches s'accordent d'ailleurs avec les résultats généraux des travaux entrepris, au point de vue industriel, soit par le docteur Brix, de Berlin, soit par la marine de l'État, tant en Angleterre qu'en France.

En étudiant avec quelque attention l'ensemble de ces divers travaux, on arrive à cette conclusion, que M. Gruner avait déjà cru pouvoir tirer, il y a longtemps, de l'examen des houilles du bassin de la Loire, « *que la valeur réelle d'une houille peut mieux être appréciée à l'aide de l'analyse immédiate que par l'analyse élémentaire* (*Annales des mines*, 5e série, t. II, p. 115). L'analyse *immédiate*, qui consiste à distiller les houilles dans une cornue et à incinérer le résidu (533) permet, en effet, d'apprécier directement le pouvoir *agglomérant*, ainsi que la nature et la proportion des cendres. De plus, il est facile de montrer, surtout à l'aide du travail de MM. Scheurer-Kestner et Meunier, que le pouvoir *calorifique* croît et décroît avec la proportion du *carbone fixe* laissé par la distillation. Cela est du moins vrai pour les houilles proprement dites, mais non pas toujours pour les anthracites et les lignites.

Le tableau suivant contient le résumé des recherches de MM. Scheurer-Kestner et Meunier. Il donne, dans une première colonne, le pouvoir calorifique réel; dans les suivantes, la composition élémentaire, puis les pouvoirs calorifiques calculés, soit d'après la loi de Dulong, soit d'après le carbone et l'hydrogène total contenus; enfin, dans la dernière, la proportion de coke ou de carbone fixe; le tout en faisant abstraction des cendres et en supposant les houilles séchées vers 110°.

ORIGINE des combustibles.	POUVOIR CALORIFIQUE réel.	COMPOSITION des combustibles. C	H	O + Az	POUVOIR CALORIFIQUE de C + H	POUVOIR CALORIFIQUE d'après la loi de Dulong.	PROPORTION DE CARBONE fixe (ou charbon) par 100 de combustible sec et privé de cendres.
Houille anthraciteuse du Creusot.	9456	92,36	3,66	3,98	8724	8552	88,1
Houille maigre du puits Saint-Paul du Creusot.	9263	90,79	4,24	4,97	8897	8683	84,2
Houille grasse à courte flamme du puits Chaptal du Creusot.	9622	88,48	4,41	7,11	8670	8363	80,4
Houille grasse de Ronchamp se rapprochant des houilles à courte flamme.	9077	88,32	4,79	6,89	8790	8494	73,0
Houille grasse d'Anzin (Nord). .	9257	84,47	4,21	11,32	8277	7789	77,2
Houille grasse de Denain (Nord).	9050	83,94	4,43	11,63	8310	7810	70,3
Houille grasse à longue flamme de Duttweiler (Saarbrück).. .	8724	83,82	4,60	11,58	8358	7858	63,5
Houille grasse à longue flamme de Sultzbach (Saarbrück). . .	8603	83,35	5,17	11,48	8517	8024	64,4
Houille grasse à très longue flamme de von der Heydt (Saarbrück).	8462	81,56	4,98	13,46	8306	7727	60,4
Houille sèche à longue flamme de Montceau (Saône-et-Loire). Coke à demi agglutiné.	8325	78,58	5,23	16,19	8151	7455	60,6
Houille demi-sèche à longue flamme des couches supérieures de Friedrichsthal (Saarbrück). Le coke est peu agglutiné. . .	8457	78,97	4,67	16,36	7990	7287	58,5
Houille sèche à longue flamme de Louisenthal (Saarbrück). Coke non agglutiné.	8215	76,87	4,68	18,45	7824	7032	59,0
Lignites (521).							
Lignite très gras de Bohême ou lignite-bitume.	7924	76,58	8,27	15,15	9038	8387	25
Lignite gras de Manosque. . . .	7363	70,57	5,44	23,99	7576	6542	48,8
Lignite sec de Manosque.. . . .	7006	66,31	4,85	28,84	7029	5788	46,8
Lignite sec du Rocher-Bleu. . .	6480	72,98	4,04	22,98	7289	6300	52,0
Bois fossile, passant au lignite (Bohême), ou bois bitumineux.	6358	66,51	4,72	28,77	7001	5760	50,4
Bois bitumineux, autre échantillon.	6311	67,60	4,55	27,85	7030	5831	51,4
Cellulose (C^{12},H^{10},O^{10}).	3622	44,44	6,17	49,39	5717	3590	28 à 30

Si l'on compare entre eux les divers nombres que renferme ce tableau, on constate sans peine que plusieurs houilles de composition presque identique ont des pouvoirs calorifiques fort différents, mais que les chaleurs de combustion augmentent et diminuent avec les proportions de coke et semblent ainsi dépendre surtout des éléments volatils. Ainsi la houille du puits Chaptal, au Creusot, et celle de Ronchamp renferment des proportions presque identiques de carbone et d'hydrogène, et cependant le pouvoir calorifique du premier combustible est de 9622, tandis que celui du second n'est que de 9077. Mais la houille du Creusot

ne fournissant que 19,6 p. 100 de matières volatiles, lorsque celle de Ronchamp en donne 27 p. 100, la première est, d'après cela, une houille grasse à *courte flamme*, et la seconde, une houille grasse *ordinaire*. Le mode de combinaison des éléments est tout autre dans les deux cas. L'hydrogène et l'oxygène emportent plus de carbone lorsqu'on distille la houille de Ronchamp; par suite, dans ce combustible, l'union des gaz avec le carbone est plus intime que dans celle du Creusot; par suite aussi, au moment même où cette combinaison plus intime s'est constituée, une plus grande somme de chaleur fut dégagée et perdue. Plus la proportion de matières volatiles est considérable, moins le pouvoir calorifique est grand.

En comparant les deux houilles de notre bassin du Nord (Anzin et Denain) aux deux charbons de Duttweiler et de Sultzbach du bassin de Saarbrück, on voit que la composition *élémentaire* est peu différente; que les matières volatiles qui résultent de l'analyse immédiate font ranger les houilles du Nord parmi les charbons *gras ordinaires*, presque à *courte flamme* même pour celle d'Anzin, tandis que les deux houilles de Saarbrück sont des charbons *gras à longue flamme*; enfin, que les différences de caloricité, variant de 300 à 600 calories, croissent et décroissent dans le même sens que les proportions de coke.

En poursuivant encore l'examen du tableau, on voit que les charbons les plus pauvres en coke développent le moins de chaleur. Si le Louissenthal fournit 247 calories de moins que le von der Heydt, quoique les proportions de coke soient presque identiques, cela doit tenir très probablement à la circonstance que, dans les matières volatiles elles-mêmes, les trois éléments ne sont pas toujours constitués de la même façon.

Ainsi l'on peut admettre que le pouvoir calorifique décroît d'une manière générale avec la proportion de coke, et que l'analyse immédiate peut ainsi conduire, d'une façon approximative, au pouvoir calorifique. Il convient de remarquer cependant que la proportion de coke décroît plus rapidement que le pouvoir calorifique. En comparant les extrêmes, on trouve :

Pour le rapport des pouvoirs calorifiques . . . . $\frac{9622}{8215} = 1{,}17$

Et pour celui des proportions de coke . . . . $\frac{80{,}4}{59{,}0} = 1.36$

Cette réserve faite, il n'en demeure pas moins vrai que l'analyse immédiate fournit une image plus vraie des propriétés essentielles des houilles (pouvoir calorifique, pouvoir agglomérant et cendres) que l'analyse élémentaire; et, comme elle exige d'ailleurs beaucoup moins de temps et d'habileté, elle est en tout cas préférable au point de vue industriel.

Autre fait qui se dégage aussi du tableau précédent : le pouvoir calorifique *réel* de tous les combustibles, à part celui du lignite bitumineux de Bohême, qui, par sa forte dose en hydrogène, se rapproche des

pétroles (1), est non seulement plus considérable que le pouvoir calorifique *calculé* d'après la formule de Dulong, mais encore, en ce qui concerne les anthracites et les houilles proprement dites, plus élevé que la somme des calories dues au carbone et à l'hydrogène total. Ainsi, par exemple, la houille du puits Chaptal a donné 9622 calories, lorsque C + H correspondent à 8670.

M. Scheurer-Kestner, frappé de cette apparente anomalie, en tire la conclusion que la combinaison du carbone et de l'hydrogène a dû se faire, dans les houilles, avec *absorption* de chaleur, à la façon des composés *explosibles*. Mais cette anomalie n'est réellement qu'*apparente*. La houille n'a aucun des caractères des substances explosibles, et si le pouvoir calorifique réel est supérieur au nombre calculé, cela provient uniquement de ce qu'on a recours pour le carbone au chiffre de 8080 calories, tandis qu'il faudrait prendre un nombre plus voisin de 11214, qui est le pouvoir calorifique théorique du carbone gazéifié (2). En tout cas, il est évident, même en ne considérant ce nombre de 11214 calories que comme le résultat d'une spéculation purement théorique, que le carbone *peu condensé* des houilles doit produire plus de chaleur que le carbone pur, extrait du charbon de bois. D'autre part, pour l'hydrogène *solidifié*, il faudrait choisir un nombre inférieur au chiffre 34462 calories qui correspond à l'hydrogène *gazeux* donnant de l'eau, prise également à l'état de gaz.

Il est facile de s'assurer que l'on arriverait à des valeurs moins éloignées de la vérité si l'on adoptait, par exemple, 9000 calories pour la chaleur de combustion du carbone de la houille, et 30000 calories pour celle de l'hydrogène solidifié. L'accord n'est cependant pas satisfaisant; en particulier le calcul donne des valeurs trop peu élevées pour les houilles riches en carbone fixe, et, au contraire, trop fortes pour celles qui laissent peu de coke.

En résumé, il est évident que le mode de combinaison des éléments d'une houille est trop variable pour qu'il soit possible de déduire le pouvoir calorifique de la simple analyse élémentaire.

Il faut donc, ou déterminer directement par expérience le pouvoir

(1) Le pétrole et les roches à pétrole forment une série tout à fait distincte des houilles. Ils sont caractérisés par une teneur fort élevée en hydrogène qui leur communique un pouvoir calorifique considérable, malgré la faible proportion de carbone fixe. Gruner classe dans la série du pétrole les bitumes solides, les lignites bitumineux de Bohême, le bogheat d'Écosse, le jayet, certaines variétés de cannel-coal, etc.

(2) Voici comment on arrive au nombre de 11214 calories. On sait que le carbone développe 2473 calories lorsqu'il se transforme en oxyde de carbone, et ce dernier gaz produit à son tour 8080 — 2473 = 5607 calories, lorsqu'il se combine avec un nouvel équivalent d'oxygène, c'est-à-dire qu'en apparence des quantités égales d'oxygène développent des quantités fort inégales de chaleur. Je dis en *apparence*, parce que, dans le premier cas, le carbone *solide* passe à l'état *gazeux*, tandis que, dans la combustion de l'oxyde de carbone, c'est du carbone *déjà gazéifié* qui brûle. Or si l'on admet, avec M. Bankine, que la loi de Welther reste vraie dès que les réactions chimiques ne sont ni suivies ni accompagnées de changement d'état, on voit que l'excès de 5607 sur 2473, soit 3134 calories, doit précisément correspondre à la chaleur absorbée par la gazéification du carbone; par conséquent, le carbone *gazeux* développerait 8080 + 3134 = 11214 calories, s'il donnait directement de l'acide carbonique.

calorifique de chaque espèce de houille, ou bien se contenter des moyennes auxquelles on arrive en combinant les expériences de Mulhouse, résumées dans le tableau précédent, avec les nombreux essais industriels faits à Berlin par M. le docteur Brix, et, en France ainsi qu'en Angleterre, par les marines de l'État.

528. Donnons les chiffres auxquels on arrive ainsi, en faisant connaître les autres propriétés des diverses sortes de houille.

Tous les combustibles, sauf peut-être certains pétroles et certains graphites, sont d'origine végétale ; les uns, comme le bois et la tourbe, se forment encore journellement sous nos yeux ; les autres, les *combustibles minéraux*, depuis longtemps enfouis dans le sein de la terre, ont subi des modifications qui ont profondément altéré leur nature première : la couleur a graduellement passé du blanc au brun et au noir ; la densité a plus que doublé ; l'oxygène et l'hydrogène ont disparu en partie, entraînant avec eux une partie du carbone ; l'oxygène surtout se trouve éliminé, en sorte que le combustible solide, ainsi modifié, contient, en général, d'autant plus de carbone et d'autant moins d'oxygène que l'altération est plus avancée.

Dans la substance ligneuse pure, la *cellulose*, la proportion d'oxygène dépasse d'un dixième celle du carbone, tandis que dans les combustibles les plus altérés, les anthracites, elle n'atteint que le quarantième de la teneur en carbone. La décroissance relative de l'hydrogène est sensible aussi, quoique moins prononcée. Dans la cellulose, on trouve pour 1 000 de carbone, 139 d'hydrogène ; dans les houilles, il en reste 75 à 40 ; dans les anthracites, 40 à 25.

Comme l'oxygène disparaît plus rapidement que l'hydrogène, les divers combustibles peuvent surtout être caractérisés par le rapport $\frac{O}{H}$ ou $\frac{O + Az}{H}$, la proportion d'azote étant toujours très faible, ou encore par la proportion de charbon que fournit la distillation du combustible supposé sec et sans cendres.

Tableau résumant ces données, et destiné à marquer les types.

NOMS DES COMBUSTIBLES.	Rapport $\frac{O}{H}$ ou $\frac{O + Az}{H}$	PROPORTION de charbon fourni par le combustible sec et pur.
Dans la cellulose pure, on trouve	8	0,28 à 0,30
Dans les bois (cellulose et matière incrustante). . . .	7	0,30 à 0,35
Dans les tourbes et les bois fossiles.	6 à 5	0,35 à 0,40
Dans les lignites proprement dits (1)	5	0,40 à 0,50
Dans les houilles.	4 à 1	0,50 à 0,90
Dans les anthracites	1 à 0,75	0,90 à 0,92

(1) Mais non dans les lignites *bitumineux*, qui se rapprochent des pétroles, et sont, comme eux, exceptionnellement riches en hydrogène.

Occupons-nous des houilles, qui sont de beaucoup les plus importants de ces combustibles.

La densité des houilles pures, peu chargées de cendres, est comprise entre 1,25 et 1,35; les plus riches en carbone sont les plus denses. Le poids du mètre cube en morceaux varie de 700 à 900 kilog.

Composition élémentaire des houilles :

Carbone	75 à 93
Hydrogène	6 à 4
Oxygène (y compris l'azote)	19 à 3
	100

Au point de vue industriel, on peut résumer les houilles dans les cinq types caractérisés dans le tableau suivant :

NOMS des cinq types ou classes.	COMPOSITION ÉLÉMENTAIRE.			RAPPORT $\frac{O}{H}$ (1)	PROPORTION de charbon fourni par la distillation	NATURE et aspect du charbon obtenu.
	C	H	O (1)			
1° Houilles *sèches à longue flamme*. . . .	75 à 80	5,5 à 4,5	19,5 à 15,5	4 à 3	0,50 à 0,60	Pulvérulent ou tout au plus fritté.
2° Houilles *grasses à longue flamme*, ou charbon à *gaz*. . . .	80 à 85	5,8 à 5	14,2 à 10	3 à 2	0,60 à 0,68	Fondu, mais très fendillé.
3° Houilles *grasses* proprement dites, ou charbon de *forge*. .	84 à 89	5 à 5,5	11 à 5,5	2 à 1	0,68 à 0,74	Fondu, moyennement compact.
4° Houilles *grasses à courte flamme*, ou charbon à *coke*. . .	88 à 91	5,5 à 4,5	6,5 à 5,5	1	0,74 à 0,82	Fondu, très compact, peu fendillé.
5° Houilles *maigres* ou anthraciteuses. . . .	90 à 93	4,5 à 4	5,5 à 3	1	0,82 à 0,90	Fritté ou pulvérulent.

(1) L'oxygène comprend en réalité l'azote, mais la proportion d'azote dépasse rarement 1 p. 100 du poids des combustibles.

Cette classification de Gruner diffère peu de celle de Regnault. Les trois premiers types correspondent aux trois premiers genres de ce savant. La différence porte sur les deux derniers. Gruner sépare complètement les houilles des anthracites proprement dits, et laisse dans la classe des houilles *maigres* les charbons dont le coke conserve encore une certaine tendance à se fritter. Il nomme les houilles du quatrième type houilles *grasses à courte flamme* et non houilles *fortes* et *dures*, pour éviter toute équivoque. Les houilles à courte flamme sont appelées *dures* par Regnault, d'après la qualification adoptée dans le Nord, parce qu'elles *durent* au feu, tandis qu'au fond ces houilles sont les plus tendres et les plus friables de toutes.

Gruner insiste aussi sur la différence à établir entre les houilles sèches et les houilles maigres. Le plus souvent, on emploie indifféremment l'un ou l'autre terme pour désigner par là un charbon non *col-*

lant. Pour éviter toute confusion, il convient de réserver le mot de *sec* pour le premier type, où l'absence du pouvoir agglomérant est due, comme dans les lignites, à la forte proportion d'oxygène, et d'appliquer par contre le terme de *maigre* uniquement aux houilles peu grasses qui passent aux anthracites, par suite de la forte teneur en carbone et de la faible proportion d'hydrogène. On remarquera encore que cette classification est surtout basée sur l'analyse *immédiate*, c'est-à-dire sur la proportion et la nature du résidu de la distillation qui correspond d'ailleurs au pouvoir calorifique (533).

Les cinq types de houille se reconnaissent déjà, jusqu'à un certain point, par les caractères extérieurs; mais il convient pourtant, si l'on veut éviter toute erreur, de les soumettre à l'analyse immédiate. Les houilles à longue flamme, voisines des lignites, sont relativement dures, sonores au choc, tenaces, à cassure inégale, d'un noir mat et à poussière plutôt brune que noire. A mesure que l'oxygène diminue et que, par suite, la proportion d'eau fournie par la distillation tend à décroître, on voit la houille devenir plus friable, moins sonore, plus noire et plus dense. L'éclat augmente surtout avec la proportion d'hydrogène, et avec l'hydrogène aussi, le pouvoir agglomérant. Enfin, les houilles qui passent aux anthracites sont d'un noir pur, et de nouveau, en général, un peu moins tendres que les houilles grasses à courte flamme.

Ces diverses propriétés sont au reste notablement modifiées par les éléments terreux. La densité et la dureté croissent avec la teneur en cendres, tandis que l'éclat tend à diminuer.

La *combustibilité* et l'*étendue de la flamme* dépendent des éléments volatils. Les houilles voisines des lignites s'enflamment aisément, elles brûlent avec flamme longue et fuligineuse; on les appelle *flambantes*. Celles qui sont peu riches en matières volatiles, et surtout en hydrogène, s'enflamment et brûlent moins facilement; elles se consument plus lentement; elles *durent* au feu; la flamme est d'ailleurs courte et peu enfumée.

La combustibilité des houilles dépend aussi de la nature des cendres. Lorsqu'elles sont ferrugineuses et calcaires, elles encrassent et empâtent les grilles sous forme de *mâchefer*. Les cendres purement argileuses ou siliceuses restent pulvérulentes et gênent beaucoup moins la combustion. Dans les cendres argileuses on rencontre pourtant presque toujours, comme dans les argiles les plus réfractaires, une faible proportion de potasse ou de soude. Le phosphate de chaux s'y montre également et contribue, avec les alcalis, à donner aux cendres des houilles des propriétés fertilisantes.

La classification ci-dessus adoptée s'accorde non seulement avec le pouvoir calorifique, mais encore, jusqu'à un certain point, avec l'*âge géologique*. Ainsi, *dans la plupart des bassins houillers*, on constate que les couches supérieures sont plus riches en matières volatiles que les couches inférieures. Cependant cela n'est vrai que pour les couches d'un même bassin, et il faut ajouter pour les couches qui se *succèdent le long d'une même verticale*; car les houilles varient souvent d'un bassin à un

autre, et, de plus, dans un bassin donné et dans une même couche, en passant de l'un des bords du bassin à l'autre. Ainsi, la grande couche de Rive-de-Gier est à longue flamme vers l'extrémité orientale du bassin et anthraciteuse à son extrémité occidentale. Dans le pays de Galles, les houilles sont grasses à l'est, maigres à l'ouest. Dans le bassin d'Ahun (Creuse), une même couche fournit du charbon maigre vers le milieu du bassin, et du charbon gras aux deux extrémités, à moins de 3000 mètres de la partie médiane, etc., etc. Ainsi encore les houilles d'Écosse sont à longue flamme et sèches, quoique appartenant à la formation houillère *inférieure*, et les houilles des Alpes sont anthraciteuses même dans les parties les plus modernes du terrain carbonifère.

Des généralités qui précèdent, passons à l'étude spéciale des cinq types, en commençant par celui qui se rapproche le plus des lignites.

529. Tableau de la composition de quelques houilles des différents types, *d'après divers opérateurs.*

ORIGINE DES HOUILLES.	COMPOSITION des houilles, déduction faite des cendres. C	H	O+Az	MATIÈRES volatiles dans les houilles pures sans cendres, par 100.	NATURE et aspect du coke.
1er TYPE. *Houilles sèches à longue flamme.*					
Moyenne de onze couches de la Haute-Silésie.	78,87	5,14	15,09	»	Pulvérul. ou très peu fritté.
Moyenne de trois couches de la mine de Konigin-Louise (Haute-Silésie).	80,39	5,16	14,45	»	Coke fritté.
Houille de Hartley (Newcastle).	79,54	5,63	14,83	39,05	*Id.*
Houille sèche de Louisenthal (Saarbrück).	76,87	4,68	18,45	41	Coke pulvérulent.
Moyenne des couches supérieures de Saarbrück.	75,75	4,87	19,38	41,9	*Id.*
Houille très dure de la mine Louise (Haute-Silésie).	74,16	5,57	20,27	»	*Id.*
Grande couche du Sud-Staffordshire, moyenne de quatre bancs.	78,00	4,79	17,21	»	*Id.*
Houille de Blanzy, pareille à celle du Montceau citée page 618.	78,26	5,35	16,39	43	Légèrement fritté
Splintcoal d'Ecosse, à la limite des charbons gras, moyenne de trois couches.	80,98	5,42	13,60	»	Coke fritté.
Moyenne du système supérieur de Saarbrück.	75,75	4,87	19,38	45,51	Coke pulvérulent.
2e TYPE. *Houilles grasses à longue flamme, ou charbon à gaz.*					
Houille de Commentry.	82,92	5,30	11,78	36,7	Coke fondu métalloïde.
— d'Épinac.	83,22	5,23	11,55	37,3	Coke fondu, mais non boursouflé.
— de Sultzbach.	82,57	5,02	12,41	36,0	Coke fondu, peu boursouflé.
— de Duttweiler.	82,90	5,13	11,97	36,2	
— de Heinitz.	81,32	4,97	13,71	38,0	
Moyenne du système inférieur de Saarbrück.	82,08	5,04	12,88	38,3	
Moyenne des sept couches inférieures de Friedrichsthal.	80,25	5,23	14,52	40,0	*Id.*
Moyenne de trois couches de Bruay, Marlhes, Bully (Pas-de-Calais).	83,42	5,82	10,76	36 à 39	Coke bien fondu, léger.
Flenu gras de Mons, moyenne de quatre couches.	85,20	5,66	9,14	31 à 32,8	*Id*

ORIGINE DES HOUILLES.	COMPOSITION des houilles, déduction faite des cendres. C	H	O+Az	MATIÈRES volatiles dans les houilles pures sans cendres, par 100.	NATURE et aspect du coke.
3e TYPE. *Houilles grasses proprement dites, ou charbons de forge.*					
Grande couche de la Grand'Croix (Rive-de-Gier) :					
1° Partie supérieure	89,04	5,23	5,73	31,5	Fondu, très boursouflé.
2° Partie inférieure	89,07	4,93	6,00	30,2	Bien fondu, mais moins bours.
Houille grasse de Newcastle	89,19	5,31	5,50	»	Coke bien fondu.
Houille grasse de Durham (Yorkshire)	85,43	5,30	9,27	»	*Id.*
Moyenne de cinq couches de Denain, près Valenciennes	86,79	5,54	7,67	32,8 à 35,0	*Id.*
Moyenne de neuf couches du bassin de Valenciennes	87,75	5,19	7,06	26,2 à 33,3	*Id.*
Moyenne de trois couches de Lens, Hersin et Billy-Montigny (Pas-de-Calais)	87,59	5,43	6,98	24 à 32	*Id.*
4e TYPE. *Houilles grasses à courte flamme, ou charbons à coke.*					
Houille du puits Henry (Rive-de-Gier) (couche bâtarde)	90,53	5,05	4,42	23,7	Coke fondu.
Houille de Rochebelle près Alais (Gard)	90,55	4,92	4,53	22,3	Complét. fondu.
Houille du puits Chaptal du Creusot	88,48	4,41	7,11	19,6	*Id.*
Moyenne de six couches, dites *fines forges*, de Mons	88,66	4,88	6,46	22,2	Bien fondu.
Moyenne de sept couches du Centre (Belgique)	89,09	4,79	6,12	19,75	*Id.*
Moyenne de trois couches de Charleroi	89,29	4,80	5,91	18,31	*Id.*
5e TYPE. *Houilles maigres ou anthraciteuses.*					
Houille du puits Saint-Paul, du Creusot	90,79	4,24	4,97	15,8	Coke fritté.
Houille anthraciteuse du Creusot	92,36	3,66	3,98	11,9	Coke pulvérulent.
Moyenne de huit couches de Charleroi	90,42	4.27	5,31	15 à 11	Coke fritté.
Moyenne de cinq couches de Charleroi	91,03	3,96	5,01	13,7 à 8,3	Coke pulvérulent.
Rolduc (Aix-la-Chapelle)	93,56	4,28	2,16	10,9	*Id.*
Mayenne	92,85	3,96	3,19	9,1	*Id.*

530. *Résultats des expériences de vaporisation du* Docteur Brix *à Berlin, en vue du pouvoir calorifique industriel, et de celles dont* M. Scheurer-Kestner *s'est occupé, concurremment avec ses expériences calorimétriques proprement dites.* (Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse, 1868.)

ORIGINE DES HOUILLES.	PROPORT. d'eau. (dans la houille, par 100.)	PROPORT. de cendr. (dans la houille, par 100.)	POIDS D'EAU A 0°, vaporisée vers 112°, par kilog. de houille brûlée. March^{de}.	Pure.	OBSERVATIONS.
1er TYPE. *Houilles sèches à longue flamme.*			kilog.	kilog.	
Houille sèche de la mine Louise (Haute-Silésie). .	3,65	6,83	6,28	7,02	Expériences de M. Brix.
Houille à coke fritté, de la mine Gerhardt (Saarbr.)	5,10	6,84	6,85	7.78	*Id.*
Houille sèche de la mine Léopold (Silésie supér.).	4,10	5,10	6,10	6,72	*Id.*
Houille sèche de Louisenthal (Saarbrück).	3.57	12,28	6,06	7,29	Expér. de M. Scheurer-Kestner.
Houille sèche du Monteeau (Saône-et-Loire).	4,97	10,28	6,20	7,41	*Id.*
2e TYPE. *Houilles grasses à longue flamme, ou charbons à gaz.*					
Houille des couches supér. de Friedrichsthal (Saarbrück).	1,00	12,70	6,31	7,73	Houille *demi-grasse* à 41,5 p. 100 de matières volatiles. (M. Brix. M. Scheurer-Kestner)
Houille de Sultzbach. . .	1,63	10,46	6,61	7,76	Houilles *grasses à longue flamme* proprement dites, du bassin de Saarbrück.
— de Duttweiler. . .	1,75	13,25	6,79	8,25	
— de Heinitz.	1,79	11,57	6,91	7,83	
— de Attenwald. . .	2,54	13,50	6,95	8,27	
— de Heinitz, couche Blücher (Saarbrück). . .	2,00	2,28	7,83	8,18	Échantillons très peu chargés de cendres.
Houille de Duttweiler, couche Natzmer.	1,50	1,11	7,80	8,01	
3e TYPE. *Houilles grasses proprement dites, ou charbons de forge.*					
Houille de Ronchamp :					
1re série d'expériences. .	0,66	12,74	7,14	8,72	La 1re série a donné un chiffre plus faible à cause de la prop. insuffis. d'air pour la combust^{on}. (M. Scheurer-K.)
2e série d'expériences. .	1,09	16,19	7,62	9,16	
Houille de Wettin (Prusse).	0,60	11,96	7,65	8,75	Expériences de M. Brix.
— d'Eschweiler (Prusse).	0,80	3,30	8,76	9,18	
Houille de la mine d'Engelsburg (bassin de la Ruhr).	1,40	3,25	8,31	8,72	
Houille de la mine le Président (bassin de la Ruhr).	1,40	2,28	8,11	8,47	

531. Reprenons successivement les cinq types de houilles :

1° *Houilles sèches à longue flamme.* Ce type est caractérisé par la nature spéciale du coke. Lorsqu'on distille la houille en morceaux, les fragments se fendillent, mais conservent leur forme; en tous cas, il n'y a ni fusion ni agglomération, et lorsqu'on opère sur de la houille en poudre, le coke reste pulvérulent. A la vérité, les houilles *maigres*

de la cinquième classe donnent également un coke non déformé, ni aggloméré, mais les deux types ne sauraient se confondre, car les houilles sèches laissent au maximum 60 p. 100 de coke, et brûlent toujours avec flamme *longue* enfumée, tandis que les houilles *maigres* produisent pour le moins 80 p. 100 de coke, et par cela même, une flamme *courte* et claire. Les premières ressemblent aux lignites secs, les dernières aux anthracites.

Les houilles sèches, comme les lignites secs, sont en général dures, compactes et peu friables, quoique d'une densité faible, de 1,25. Le poids du mètre cube en fragments est de 700 kilog. La cassure est unie, ou conchoïdale, plus ou moins esquilleuse. La couleur est rarement d'un noir pur, en tous cas la poussière est brune. Comme leur nom l'indique, ces charbons brûlent avec flamme et fumée abondantes; ce sont des charbons *flambants*.

Le tableau de la page 700 donne la composition *élémentaire* moyenne des houilles sèches, et 4 à 3 pour le rapport $\frac{O + Az}{H}$.

La composition *immédiate* est :

Charbon non aggloméré	50 à 60	
Eau ammoniacale	12 à 5	Matières volatiles 50 à 40.
Bitume	18 à 15	
Gaz	20 à 20	
	100	

D'après les essais de MM. Scheurer-Kestner et Meunier, le pouvoir calorifique des charbons secs à longue flamme, déduction faite des cendres, est en moyenne de 8200 à 8300 calories. Mais certains charbons, plus rapprochés des lignites, doivent développer au maximum 8000 calories; par contre, les houilles voisines des charbons gras doivent atteindre 8500 calories.

Les houilles tout à fait sèches sont rares en France. On ne peut guère citer que celle de Noroy, dans les marnes irisées des Vosges. Dans le terrain houiller proprement dit, les houilles qui s'en approchent le plus donnent un coke légèrement *fritté*, formant la transition aux houilles *grasses à longue flamme*. Tels sont les charbons des couches les plus hautes des bassins de Blanzy et du Montceau, les charbons des parties élevées de l'Allier et de l'Aveyron, et ceux du bassin de Saint-Éloi, dans le Puy-de-Dôme.

En Allemagne, les charbons *secs* se rencontrent surtout dans la partie supérieure du bassin de la Haute-Silésie. On en trouve également à Saarbrück; mais là abondent plutôt, ainsi que dans la Basse-Silésie, les charbons à coke légèrement fritté qui passent déjà aux charbons gras comme ceux de Blanzy.

Dans le Royaume-Uni, les charbons secs sont fournis par l'Écosse, le Derbyshire, le Staffordshire, etc., où ils servent, en Écosse surtout, à l'état brut dans les hauts fourneaux. Dans les parties inférieures de ces

mêmes bassins, on arrive graduellement, comme en Allemagne, aux charbons *mi-gras* à coke plus ou moins fritté.

Le tableau de la page 702 contient quelques analyses se rapportant à ce premier type.

Ce tableau montre que les houilles commencent à devenir collantes dès que la proportion de carbone atteint 80 p. 100, et que l'oxygène descend au-dessous de 15 p. 100.

Cette proportion-limite de 80 de carbone pour 15 d'oxygène et d'azote, correspond par suite aux charbons à coke fritté, qui servent de lien entre les houilles sèches et les houilles grasses. Ces charbons-limites donnent à la calcination 40 à 41 p. 100 de matières volatiles.

Des expériences de vaporisation, entreprises par le docteur Brix, à Berlin, en vue du pouvoir calorifique industriel, et de celles dont M. Scheurer-Kestner s'est occupé, concurremment avec ses expériences calorimétriques proprement dites (tableau de la page 704), il résulte que les houilles sèches proprement dites ne vaporisent à 112° guère plus de 6 kilog. à $6^{ks},30$ d'eau à la température de 0°, ou $6^{ks},70$ à $7^{ks},50$, lorsqu'on considère les houilles pures et sèches; tandis que dans les mêmes circonstances les bonnes houilles *grasses à courte flamme* vaporisent, comme nous le verrons, 8 kilog. à $8^{ks},50$ à l'état marchand, ou 9 kilog. à $9^{ks},50$ lorsqu'on les suppose sans cendres ni eau. Si l'on voulait passer de ces unités aux calories proprement dites, il suffirait de les multiplier par 640, chiffre qui représente le nombre de calories absorbées par l'eau, quand on la chauffe depuis 0° jusqu'à l'état de vapeur à 112° (490).

Ces essais, et d'autres encore, donnent pour le pouvoir calorifique industriel des houilles sèches les trois quarts du pouvoir calorifique utile des houilles grasses à courte flamme. C'est le même rapport que celui qui existe entre les proportions de coke : 55 à 75 et 60 à 80 (tableau de la page 700).

2° *Houilles grasses à longue flamme, ou charbons à gaz.* Ce type diffère du précédent par la nature du coke. Lorsqu'on carbonise ces houilles, les fragments changent de forme et se fendent, ou bien, lorsqu'on opère sur de la poussière, les grains isolés s'agglomèrent en une masse unique plus ou moins poreuse. Entre les deux premiers types se trouvent les charbons-*limites* dont le coke est simplement *fritté*, ou légèrement déformé.

Les houilles *grasses à longue flamme* sont encore, en général, dures et tenaces, quoique déjà à un moindre degré que les houilles sèches. La cassure est plutôt lamelleuse qu'unie ou esquilleuse. La densité des fragments, peu chargés de cendres, est généralement comprise entre 1,28 et 1,30; le mètre cube en morceaux pèse 700 à 750 kilog. La couleur est plus noire que celle des charbons secs, leur éclat plus vif.

Les houilles de ce type, comme leur nom l'indique, brûlent encore avec flamme et fumée abondantes; ce sont aussi des houilles *flambantes*, faciles à enflammer, brûlant rapidement, ce qui les fait rechercher

lorsqu'on a besoin de coups de feu vifs et rapides et non d'une chaleur modérée, uniforme et soutenue.

Le tableau de la page 700 donne la composition *élémentaire* des houilles grasses à longue flamme, et indique que le rapport $\frac{O + Az}{H}$ se maintient entre 3 et 2.

La distillation lente donne pour ces houilles :

Coke aggloméré	60 à 68	
Eau ammoniacale	5 à 3	Matières volatiles 40 à 32.
Bitume	15 à 12	
Gaz	20 à 17	
	100	

La proportion de gaz est plutôt inférieure à celle que donnent les houilles sèches, mais le gaz est plus éclairant; et comme le coke, à cause de sa consistance, a plus de valeur que celui des houilles sèches, on se sert en général, pour la fabrication du gaz d'éclairage, des charbons gras à longue flamme; on les désigne quelquefois, par ce motif, dans le commerce, sous le nom de *charbons à gaz*. Ils produisent en grand, dans les usines, 240 à 260 litres de gaz par kilogramme de houille, et même en petit, par une calcination plus rapide, jusqu'à 300 ou 350 litres. On les utilise rarement pour la fabrication du coke métallurgique. D'abord, par le fait de l'abondance des matières volatiles, elles donnent moins de coke que les deux types suivants; puis ce coke est toujours léger, friable et poreux.

Les houilles grasses à longue flamme sont, en France, beaucoup plus répandues que les charbons secs. Dans le Pas-de-Calais et la Loire, les couches les plus élevées des deux bassins en sont formées. Les charbons de Commentry et une partie de ceux de Blanzy appartiennent également à la catégorie des charbons à gaz. A Mons, en Belgique, on les connaît sous le nom de *flénus gras*, tandis qu'on appelle *flénus secs* les houilles, moins riches en carbone, dont le coke est à peine fritté. Les bons charbons de Newcastle sont de même des houilles à gaz; et à Saarbrück, comme en Silésie, on voit les charbons à gaz succéder aux charbons secs, lorsqu'on passe des couches supérieures aux couches moyennes et inférieures du bassin.

Le tableau de la page 702 contient les résultats d'analyses d'un certain nombre de houilles grasses à longue flamme, et celui de la page 704 confirme le pouvoir calorifique 8500 à 8800 fourni par ces houilles.

Du tableau de la page 704 on peut conclure que les houilles grasses à longue flamme, supposées sèches et sans cendres, et donnant 60 à 68 p. 100 de coke, peuvent vaporiser en moyenne 8 kilog. d'eau. Les limites extrêmes sont 7^{kg},50 pour les houilles à coke simplement fritté, et 8^{kg},30 pour les houilles voisines des charbons gras ordinaires. Les houilles marchandes, à 10 p. 100 de cendres et d'eau, ne dépassent guère 7 kilog. à 7^{kg},50. D'après des essais faits à Woolwich et à Portsmouth, les charbons gras à longue flamme de Hartley (Newcastle) vaporisent

7 kilog. à $7^{kg},75$ d'eau, lorsque les proportions de cendres et d'eau atteignent 5 à 8 p. 100 du poids de la houille, résultat qui ne diffère guère des chiffres précédents.

3° *Houilles grasses proprement dites, ou charbons de forge.* Les charbons de ce troisième type sont noirs, à éclat vif, peu durs, d'une structure plus ou moins feuilletée ou lamelleuse. Ils brûlent avec flamme moins longue, moins enfumée, plus brillante que les charbons des deux types précédents. Au feu, ils se ramollissent, ou fondent même complètement, à la façon de la résine ou du brai. Tout en renfermant moins de matières volatiles que les charbons à longue flamme, ils gonflent davantage sous l'action de la chaleur. Par suite de la fusion, ou du ramollissement que le charbon éprouve au feu, le menu se colle et s'agglutine en masses compactes, ce qui le rend éminemment propre au travail de la forge; il forme *voûte*, dans le foyer du maréchal, au-dessus de la pièce de fer que l'on se propose de chauffer; de là, les noms de charbons de *forge*, *fine forge*, houilles *maréchales*, sous lesquelles on désigne ce type dans le commerce. Cette même propriété le rend également apte à donner de bons cokes; de là aussi le nom de charbons *collants*. Il convient toutefois de remarquer que ce dernier terme convient aux trois types de charbons *gras*, qui peuvent tous trois, en effet, servir comme charbons à *gaz*, charbons de *forge* et charbons à *coke;* seulement le premier de ces types convient spécialement pour le gaz, à cause de l'abondance des matières volatiles; le dernier, celui des charbons gras à courte flamme, pour le coke, à cause de la proportion élevée de carbone fixe et de la compacité du résidu charbonneux. Ainsi, quoique les houilles grasses proprement dites servent très souvent pour la fabrication du coke, et quelquefois pour celle du gaz d'éclairage, on doit cependant préférer, pour le coke les charbons à courte flamme (4° type), et pour le gaz les houilles grasses à longue flamme (2° type).

La densité moyenne des houilles grasses est de 1,30, et le poids du mètre cube en morceaux, de 750 à 800 kilog.

La composition *élémentaire* des houilles grasses proprement dites est donnée au tableau de la page 700, ainsi que la valeur 2 à 1 du rapport $\frac{O + Az}{H}$.

L'analyse *immédiate* conduit aux nombres suivants :

Coke compact et bien fondu	68 à 74	
Eau ammoniacale.	3 à 1	Matières volatiles 32 à 26.
Bitume	13 à 10	
Gaz.	16 à 15	
	100	

Le pouvoir calorifique des houilles grasses pures, sans cendres ni eau, varie de 8800 à 9300 calories. On peut citer spécialement les charbons de Ronchamp, de Denain et d'Anzin du tableau général de la page 696.

Les houilles grasses proprement dites sont fort abondantes en France ; elles se rencontrent surtout dans le bassin de Saint-Étienne et dans la partie moyenne des bassins du Nord et du Pas-de-Calais. Elles abondent aussi, en Belgique, autour de Liège et dans la partie inférieure du bassin de Mons, en Westphalie (bassin de la Ruhr) et dans la zone inférieure du bassin houiller du nord de l'Angleterre (Yorkshire). Dans le pays de Galles, le charbon gras proprement dit existe seulement aux environs de Newport, vers l'extrémité orientale de ce bassin.

Le tableau de la page 696 donne la composition de la houille grasse de Ronchamp, et celui de la page 702 celle de quelques charbons gras de divers pays, appartenant à la classe des charbons de forge.

Le tableau de la page 704 montre que les houilles grasses proprement dites, supposées pures, vaporisent en moyenne $8^k,75$ d'eau, les limites extrêmes étant $8^k,40$ et $9^k,20$. Les houilles marchandes, tenant 5 à 15 p. 100 de matières étrangères, vaporisent $7^k,50$ à $8^k,30$, lorsque l'air comburant est dans les proportions voulues.

4° *Houilles grasses à courte flamme, ou à charbons à coke.* Les houilles grasses peu riches en matières volatiles ont la même texture que celles du type précédent, mais leur éclat est en général moins vif; bien souvent même elles ont l'apparence striée; elles sont formées de raies, ou bandes étroites, alternativement brillantes et ternes. Le densité est comprise entre 1,30 et 1,35; le poids du mètre cube est de 800 kilog. Les charbons gras à courte flamme sont presque toujours extrêmement friables, et si, malgré cela, on les appelle charbons *durs* en Belgique et dans le nord de la France, il faut entendre par là des charbons qui se consument lentement, qui *durent* au feu (p. 700). Ces houilles dégagent peu de matières volatiles, s'enflamment difficilement et brûlent avec flamme peu étendue; celle-ci est claire, blanche, tirant sur le bleu, très peu enfumée.

A la distillation, les fragments collent et gonflent même, mais le coke est, malgré cela, compact et dur. A la limite cependant, lorsqu'on approche des houilles maigres, l'agglutination devient incomplète. Le même effet se produit lorsqu'une houille, très peu grasse, reste pendant quelque temps exposée à l'air; l'élément collant se modifie alors par oxydation lente, ou se vaporise même en partie. Il faut donc carboniser ces sortes de houilles, à l'état frais, presque au sortir de la mine. Dans ces conditions, on obtient alors d'excellents cokes, denses et durs; de plus, la proportion en sera toujours fort élevée à cause de la faible dose des éléments gazeux. Ce sont, en un mot, les vraies houilles pour coke, celles qui donnent à la fois le plus de coke et les cokes les plus recherchés.

Le tableau de la page 700 donne la composition élémentaire des houilles grasses à courte flamme, ainsi que le rapport $\frac{O + Az}{H}$, qui est toujours voisin de 1.

Par la distillation ces houilles donnent :

Coke	74 à 82	
Eau ammoniacale	1 à 1	Matières volatiles 26 à 18.
Bitume	10 à 5	
Gaz	15 à 12	
	100	

Les chiffres de la deuxième colonne correspondent aux houilles passant déjà aux charbons demi-maigres, dont le coke n'est que faiblement agglutiné.

Les houilles grasses à courte flamme ont le pouvoir calorique maximum parmi les combustibles minéraux solides; il atteint 9300 à 9600 calories. A partir de là, et jusqu'aux anthracites, la chaleur de combustion s'affaiblit sensiblement, par suite de l'amoindrissement de la teneur en hydrogène.

Le tableau de la page 702 contient les résultats des analyses de quelques houilles du 4e type.

Quant aux essais de vaporisation, M. Scheurer-Kestner n'a pu essayer en grand la houille grasse du Creusot; mais il a brûlé un mélange de deux tiers de houille maigre du Creusot avec un tiers de houille grasse de Ronchamp, ce qui équivaut à peu près aux charbons du 4e type. Le poids d'eau vaporisée par kilogramme de houille pure a été :

Première série d'expériences	9k,83
Seconde série d'expériences	9 ,68
Moyenne	9k,75

C'est le chiffre le plus élevé constaté par M. Scheurer-Kestner.

C'est également une houille grasse à *courte* flamme qui a donné au docteur Brix le maximum d'eau vaporisée; c'est la houille de la mine James, à Eschweiler : à l'état marchand, elle a transformé en vapeur 8k,93 d'eau, ou supposée pure, 9k,25.

Les nombreuses expériences faites en Angleterre accordent également la prééminence aux charbons gras à courte flamme du pays de Galles. Les houilles marchandes, à 5 ou 7 p. 100 de cendres, de ce district vaporisent presque toutes 9 kilog. à 9k,50 d'eau, lorsque les charbons gras du nord de l'Angleterre dépassent rarement 8k,50. Ces derniers donnent des coups de feu plus rapides, ils permettent de hausser plus rapidement la pression de la vapeur, mais ils *durent* moins au feu et développent, en somme, moins de chaleur.

Les expériences faites à Brest en 1862, sous la direction de M. Delautel, ingénieur de la marine, s'accordent également avec les résultats précédents. En représentant par 1 la puissance de vaporisation des charbons de *Cardiff*, cet ingénieur a trouvé :

Pour les charbons analogues d'Anzin	1,05 à 1,01
Pour les charbons gras à courte flamme de Roche-la-Molière (Saint-Étienne)	0,95 à 0,94
Pour les charbons gras ordinaires de la Loire	0,90
Pour le charbon gras à longue flamme de Newcastle	0.84
Pour le charbon gras à longue flamme de Blanzy (Montceau)	0,78
Pour le charbon sec à longue flamme du Montceau	0,74

Ces nombres s'accordent bien avec tout ce que nous avons dit de la valeur calorifique relative des diverses sortes de houilles.

En France, les charbons gras à courte flamme se rencontrent, outre le Creusot, vers la base des bassins de Saint-Étienne, du Gard, de Brassac, d'Ahun, du Nord, etc.; en Belgique, ils sont surtout abondants autour de Charleroi; en Angleterre, dans le pays de Galles et plus spécialement auprès de la ville de Cardiff.

5° *Houilles maigres ou anthraciteuses.* Ces houilles maigres forment le passage aux anthracites proprement dites. Elles sont noires, habituellement sillonnées de stries ternes. La cohésion est encore faible, mais elle tend pourtant à croître de nouveau dans les échantillons qui se rapprochent des anthracites compactes. Leur densité est généralement comprise entre 1,35 et 1,40; le poids du mètre cube en morceaux atteint 850 kilog. Ces houilles s'enflamment difficilement et brûlent avec flamme courte, de faible durée et presque sans fumée. Souvent elles décrépitent au feu, comme les anthracites, ce qui rend leur emploi assez difficile.

A la distillation, les houilles maigres donnent un coke à peine agglutiné et même pulvérulent. En morceaux, on peut employer ces houilles à l'état *cru* dans les hauts fourneaux; c'est le cas dans la partie occidentale du pays de Galles.

La composition élémentaire des houilles maigres est donnée au tableau de la page 700, composition qui conduit pour le rapport $\frac{O + Az}{H}$ à un chiffre plutôt inférieur que supérieur à 1.

La distillation fournit :

Coke	82 à 90	
Eau ammoniacale	1 à 0	Matières volatiles 18 à 10.
Bitume	5 à 2	
Gaz	12 à 8	
	100	

Le pouvoir calorifique des houilles maigres paraît compris entre 9200 et 9500 calories; c'est du moins ce qui résulte des deux expériences de M. Scheurer-Kestner sur les houilles maigres du Creusot (page 696), ainsi que des expériences de vaporisation, qui semblent conduire à une valeur calorique un peu moindre que pour les houilles grasses à courte flamme. Il est vrai que cette moindre valeur peut tenir en partie aux difficultés que l'on éprouve lorsqu'on veut faire brûler les houilles maigres sur des grilles. Il faut, autant que possible, les réserver pour la fabrication des *agglomérés*, ou la proportion des combustibles *gazeux*.

Le tableau de la page 702 contient les résultats des analyses élémentaires de quelques houilles maigres. Les deux dernières houilles de ce tableau passent aux anthracites proprement dites. La limite précise entre les deux classes de combustibles est impossible à tracer.

Les essais de vaporisation ont donné, pour la houille anthraciteuse

du Creusot, à l'état pur, 9k,15, et, à l'état marchand tenant 10 à 11 p. 100 de cendres, 8k,12.

Les essais faits, en Angleterre, sur les houilles maigres du pays de Galles, à 5 ou 6 p. 100 de cendres, conduisent à des nombres variant le plus souvent entre 8k,50 et 9k,50 d'eau vaporisée. C'est un peu moins que les houilles grasses à courte flamme, mais cela provient en partie de l'impossibilité de pouvoir brûler, d'une façon complète, les charbons maigres sur une grille.

Les houilles tout à fait maigres sont assez rares en France. On peut citer la lisière nord du bassin de Valenciennes, les bassins de la Sarthe, du Roannais et de la basse Loire, certaines parties des bassins du Gard, de la Creuse, etc.

En Belgique, on peut mentionner Charleroi, et, en Angleterre, le district ouest du pays de Galles (environs de Swansea et de Merthyr-Tydwill). Les houilles maigres abondent dans l'État de Pensylvanie, aux États-Unis.

Résumé. Nous indiquons, dans le tableau suivant, les propriétés caractéristiques des cinq classes de houilles (le pouvoir calorifique *industriel* est indiqué par le poids de l'eau à 0° vaporisée à 112°, par kilogramme de houille pure brûlée).

CLASSES OU TYPES des houilles proprement dites.	PROPORTIONS par 100 de houille pure		NATURE et aspect du coke.	POUVOIR CALORIFIQUE (la houille pure).	
	en coke.	en matières volatiles.		Réel.	Industriel.
				calories.	kilog.
1° Houilles *sèches* à longue flamme.	55 à 60	45 à 40	Pulvérulent ou légèrement fritté.	8000 à 8500	6,70 à 7,50
2° Houilles *grasses* à longue flamme (charbons à *gaz*).	60 à 68	40 à 32	Complètement aggloméré et le plus souvent fondu, mais poreux.	8500 à 8800	7,60 à 8,30
3° Houilles grasses proprement dites (charbons de *forge*).	68 à 74	32 à 26	Fondu et plus ou moins boursouflé.	8800 à 9300	8,40 à 9,20
4° Houilles grasses à *courte* flamme (charbons à *coke*).	74 à 82	26 à 18	Fondu, compact.	9300 à 9600	9,20 à 10
5° Houilles *maigres* ou anthraciteuses.	82 à 90	18 à 10	Légèrement fritté; le plus souvent pulvérulent.	9200 à 9500	9 à 9,50

532. Essais calorimétriques des combustibles. Pour déterminer la quantité totale de chaleur développée par la combustion complète d'un combustible, on se sert du calorimètre que Favre et Silbermann ont fait établir pour leurs *Recherches sur les quantités de chaleur dégagées dans les actions chimiques et moléculaires* (*Annales de physique et de chimie*, 1852).

C'est de ce calorimètre que se sont servis MM. Scheurer-Kestner et Meunier pour déterminer la *chaleur de combustion de la houille* (*Annales de physique et de chimie*, 1870 et 1872).

Après avoir obtenu un échantillon moyen représentant réellement le combustible que l'on veut connaître, et l'avoir finement broyé à la meule et desséché vers 120 ou 125°, on en introduit 1/2 gramme dans la nacelle en platine du calorimètre, et on le brûle à l'aide d'un courant d'oxygène, ou, pour de certaines houilles, à l'aide d'un courant formé d'un mélange de 0,60 d'oxygène pour 0,40 d'azote. Le courant gazeux doit avoir une vitesse assez grande pour maintenir la combustion très vive.

Le calorimètre donne la chaleur totale produite par le combustible. Un tube Liebig recueille séparément l'eau et l'acide carbonique provenant de la combustion; ce qui permet de doser l'hydrogène et le carbone contenus dans le combustible. Les cendres sont déterminées par la pesée de la nacelle de platine après la combustion. Le dosage de l'azote donne de 1/2 à 1 p. 100 de la houille brute. Retranchant du combustible la somme des proportions des éléments précédents, on a la proportion d'oxygène.

533. Analyse immédiate des houilles. Pour la classification des houilles de la Loire (*Annales des mines*, 1852), Gruner s'est contenté de l'analyse *immédiate*, qui consiste dans la détermination des proportions respectives de coke, de matières volatiles et de cendres.

Toutes les houilles ont été essayées, par calcination, dans un creuset de platine bien fermé, lui-même placé dans un creuset de terre, dont le vide était comblé avec de petits fragments de charbon de bois. Presque toujours Gruner a opéré sur 30 grammes de houille; mais pour avoir une moyenne plus exacte, il les prenait au hasard dans une masse, bien concassée et mêlée, pesant, le plus souvent, au moins 1 kilog. Le coke, provenant des 30 grammes de houille calcinée, était presque tout entier finement pulvérisé; puis 2 grammes de poudre ainsi obtenue étaient incinérés dans une capsule de platine chauffée au rouge dans la moufle d'un four de coupellation. On était ainsi dispensé d'agiter la matière, ce qui est toujours une cause de perte.

Distillation lente. Quelques houilles bien caractérisées de chaque classe furent, en outre, soumises à une distillation lente dans une cornue de verre. On recevait le bitume et l'eau dans une fiole tarée d'avance, et l'on tenait compte des matières retenues par le col de la cornue. On séparait l'eau, moins dense, à l'aide d'un petit entonnoir très effilé, et on la posait enfin directement dans une très petite capsule en porcelaine. A la vérité, la matière huileuse retient toujours un peu d'eau, mais comme cette faible erreur a constamment lieu dans le même sens, les résultats obtenus peuvent néanmoins être consultés avec fruit, lorsqu'on veut apprécier le degré d'oxygénation relative des divers échantillons.

En général, Gruner a opéré ces distillations sur 15 à 20 grammes, et a constamment pesé le combustible après son introduction dans la

cornue de verre. Pour toutes ces opérations on s'est servi d'une balance de précision donnant les milligrammes.

On chauffait jusqu'au ramollissement du verre, et le coke obtenu était ensuite recalciné au rouge intense dans le creuset de platine, ce qui lui faisait perdre encore 2 à 4 p. 100 de son poids.

Enfin, Gruner a opéré quelques distillations dans un tube de verre, sur environ 2 grammes, pour déterminer, sur la cuve à mercure, le volume de gaz qui se dégage d'une houille lorsqu'on la soumet, en vase clos, à une température lentement croissante.

534. Essai des houilles industrielles au point de vue de la production de vapeur. M. P. Ducos, directeur de l'Association des propriétaires d'appareils à vapeur du Sud-Ouest, à Bordeaux, a fait, en 1883, une série de recherches sur la valeur relative des houilles employées dans l'industrie, au point de vue du chauffage des chaudières et de la production de vapeur.

Les essais ont été faits avec un générateur à deux bouilleurs ayant les dimensions suivantes :

1° Corps cylindrique	longueur	5m 60
	diamètre	0m 94
	volume	3m3 88
2° Bouilleurs	longueur	6m 55
	diamètre	0m 60
	volume	3m3 67
3° Dôme	hauteur	0m 85
	diamètre	0m 62
	volume	0m3 22
4° Surface de chauffe totale	corps cylindrique 8m2 26	37m2 86
	bouilleurs 24m2 60	
5° Surface de chauffe directe		2m2 44
6° Volume d'eau contenu dans la chaudière		6m3 13
7° Volume total (chaudière, bouilleurs et dôme)		7m3 77
8° Dimensions de la grille	longueur	1m 30
	largeur	1m 00
	D'où surface	1m2 30

$$\text{Il en résulte : } \frac{\text{surface de grille}}{\text{surface de chauffe totale}} = \frac{1}{25}$$

$$\text{et : } \frac{\text{surface de chauffe directe}}{\text{surface de chauffe totale}} = \frac{1}{13}$$

Les gaz de la combustion, avant de gagner la cheminée, avaient trois circulations : autour des bouilleurs, sur le côté droit et sur le côté gauche du corps cylindrique.

Les expériences ont duré pendant cinq journées de dix heures, et ont été faites par M. Ducos *en pleine marche*, afin d'éviter les variations dues à l'échauffement des maçonneries.

On déterminait tout d'abord au laboratoire, après une prise d'échantillon méthodique, la teneur du charbon en cendres et en humidité; puis le combustible était livré au chauffeur exactement pesé ainsi que la quantité d'eau introduite dans la chaudière. Au début de chaque essai on notait : 1° la pression exacte de la vapeur après nettoyage de la

grille; 2° le niveau de l'eau dans le tube du niveau. La vapeur produite était mesurée par la quantité d'eau d'alimentation fournie à la chaudière. Autant que possible, on cherchait à déterminer l'expérience avec une pression égale à la pression de début.

L'unité choisie était la quantité de chaleur nécessaire pour produire 1 kilogramme de vapeur à 5 atmosphères (4^{kg},132 de pression) avec de l'eau prise à 0°.

Les conclusions sont les suivantes :

I. — Prix des combustibles essayés (à Bordeaux.)

Houille de Liverpool rendue à l'usine.	26 francs la tonne
— de Newcastle —	29 —
— de Cardiff —	30 —
Coke à 6 °/₀ d'humidité rendu à l'usine . . .	28 —

II. — Valeur relative des combustibles au point de vue du prix de revient des 1000 kilog. de vapeur.

Houille de Cardiff . . . . fr.	3,838 les 1000 kilog. de vapeur
— de Liverpool.	4,876 —
Coke.	5,259 —
Houille de Newcastle	5,261 —

Le cardiff fait donc réaliser sur le liverpool, qui vient immédiatement après lui, une économie de 21,3 p. 100.

Si le prix payé pour le charbon était établi en raison directe de la quantité de vapeur produite, la tonne, livrée à l'usine, devrait se payer, en prenant pour base le cardiff, à 30 francs la tonne :

Pour le coke	20 fr. 37	et non	28	francs la tonne.
Pour la houille de Liverpool . . .	20 fr. 40	—	26	—
Pour la houille de Newcastle . . .	21 fr. 42	—	29	—

III. — Rendement en vapeur des combustibles par kilogramme brûlé.

Cardiff.	7,816 de vapeur par kilog.
Newcastle.	5,507 —
Liverpool	5,332 —
Coke.	5,324 —

Il résulte donc des expériences de M. Ducos que le cardiff, bien que plus cher que les autres charbons sur les quais de Bordeaux, devient économique d'emploi, grâce à son rendement en vapeur considérable et avantageux.

535. Coke. La perte de chaleur due à la carbonisation de la houille est près de la moitié de la chaleur produite par la combustion complète de la houille.

La quantité de noir de fumée qu'on peut recueillir d'un four à coke est à peu près la 30e partie de la houille, et le poids du coke est environ moitié de celui de la houille qui l'a produit.

Le coke brûle sans flamme, en ne donnant naissance qu'à de l'acide carbonique et de l'oxyde de carbone; il n'y a par conséquent pas de fumée.

Sous la pluie, le coke absorbe jusqu'à 0,50 d'eau; mais comme elle s'évapore vite, il n'en reste finalement que de 0,05 à 0,10.

Un mètre cube de coke, tel qu'on l'emploie dans les hauts fourneaux, pèse ordinairement 400 kilog. A Paris, le coke des usines à gaz pèse de 30 à 35 kilog. l'hectolitre comble, et celui qui provient des fours, de 40 à 45 kilog.

On carbonise la houille, soit en meules, comme on le fait pour le bois, soit en vase clos, comme dans la fabrication du gaz de l'éclairage.

Les meules ont 5 à 6 mètres de diamètre sur 1 mètre de hauteur, et l'opération dure de 40 à 48 heures. Au lieu de faire les tas circulaires, on leur donne de préférence la forme d'un demi-cylindre qui a de 10 à 20 mètres de longueur sur 2 à 3 mètres de largeur et $0^{m},60$ de hauteur.

En France, on carbonise de préférence la houille dans des fours circulaires, ou elliptiques, ou encore cylindriques, construits en briques (fours Smet, Coppée, etc.). Les charges varient de 20 à 25 hectolitres de houille, et l'opération dure de 24 à 48 heures.

Dans les fours, le produit en poids est plus grand que dans les meules, et en volume il est plus petit. Dans les grands appareils, le volume du coke est ordinairement égal à celui de la houille; cependant pour la houille grasse le volume du coke surpasse quelquefois celui de la houille de 30 p. 100, et souvent il l'excède de 5 à 15 p. 100; mais pour la houille maigre il est ordinairement plus petit.

Le coke fabriqué en vase clos, comme dans la fabrication du gaz de l'éclairage, ne peut être employé à la métallurgie du fer.

Le coke provenant des houilles lavées (526) contient de 4 à 6 p. 100 de cendres et quelquefois moins; les autres en contiennent de 10 à 15. Selon que le coke renferme 5 ou 12,5 de cendres, sa puissance calorifique est $8080 \times 0,95 = 7676$ ou $8080 \times 0,875 = 7070$, soit pour la pratique 7600 ou 7000 (508, 539).

A Paris, le coke se vend environ $2^{fr},30$ l'hectolitre comble de 35 kilog.

Perte en poids due à la distillation de quelques houilles, d'après des expériences faites à la manufacture des tabacs, par MM. Clément, Gueniveau *et* Lefroy.

Houille de Blanzy (Saône-et-Loire)	0,44
Newcastle	0,395
Flénu, première variété (Mons)	0,39
Houille de Decize (Nièvre)	0,365
Id. des veines du Mathon et du Buisson (Belgique)	0,36
Flénu, deuxième variété	0,355
Houille dite nouvel Anzin	0,345
Id. de Denain	0,325
Id. dite ancien Anzin	0,255

Pour tous les usages, les cokes ont d'autant plus de valeur qu'ils laissent moins de cendres. Pour les usages domestiques, on n'emploie que des cokes légers, à cause de leur moindre prix. Les cokes à l'usage des hauts fourneaux doivent être denses et durs, qualités qu'on n'obtient que par la carbonisation lente dans les fours; la pression que le coke éprouve, pendant sa formation, par la hauteur du combustible,

paraît avoir une grande influence; il est indispensable que le coke reste un certain temps dans le four après sa formation.

Pour les locomotives, l'économie et la régularité du service exigent que les cokes soient très denses et très durs, et qu'ils ne laissent que peu de cendres, 4 à 6 p. 100. On satisfait à cette dernière condition en lavant les houilles menues avant de les carboniser.

AIR NÉCESSAIRE A LA COMBUSTION

536. Quantité d'air nécessaire à la combustion. L'acide carbonique étant composé de 27,27 de carbone et de 72,73 d'oxygène, 1 kilog. de carbone exige, pour passer à l'état d'acide carbonique $\frac{72,73 \times 1}{27,27} = 2^{kg},667$ d'oxygène, c'est-à-dire $\frac{2,667}{1,43} = 1^{mc},865$ d'oxygène à 0° et sous la pression $0^{m},76$ (1 mètre cube d'air pesant $1^{kg},293$, et la densité de l'oxygène par rapport à l'air étant 1,1056, 1 mètre cube d'oxygène pèse $1,293 \times 1,1056 = 1^{kg},43$) (nos 464 et 465), ou bien $\frac{1,865 \times 100}{21} = 8^{mc},881$ d'air atmosphérique à la même température et à la même pression (l'air étant formé en volume de 21 d'oxygène pour 79 d'azote).

L'eau étant composée de 11,1 d'hydrogène et de 88,9 d'oxygène, il s'ensuit que 1 kilog. d'hydrogène exige pour sa combustion $\frac{88,9}{11,1} = 8$ kilog. ou $\frac{8}{1,43} = 5^{mc},594$ d'oxygène à 0° et sous la pression $0^{m},76$; ce qui équivaut à $\frac{5,594 \times 100}{21} = 26^{mc},638$ d'air à la même température et sous la même pression.

Connaissant alors la quantité de carbone et celle d'hydrogène en excès que contient un combustible, il sera facile de déterminer la quantité d'air théoriquement nécessaire à sa combustion.

Comme, dans la pratique, une quantité considérable de l'air qui passe dans le foyer échappe à la combustion, il s'ensuit que pour brûler 1 kilog. de combustible il faut une quantité d'air bien plus grande que celle théoriquement nécessaire. On estime que la moitié environ de l'air qui passe dans le foyer échappe à la combustion. Pour le bois, la quantité d'air qui échappe à la combustion descend parfois à un tiers (537).

C'est d'après ces suppositions qu'ont été obtenus les résultats du tableau suivant, qui donne les quantités d'air théoriques et pratiques nécessaires à la combustion d'un kilog. de quelques combustibles (508).

DÉSIGNATION DES COMBUSTIBLES.	COMPOSITION.		VOLUME D'AIR	
	Carbone.	Hydrogène en excès.	théorique.	pratique.
			m. c.	m. c.
Bois parfaitement desséché à 140°. . .	0,50	0,01	4,71	9,42
Bois ordinaire à 0,25 d'eau.	0,375	0,0075	3,53	7,06
Charbon de bois à 0,07 de cendres et 0,07 d'eau.	0,86	0,00	7,64	15.28
Tannée sèche.	0,48	0,01	4,53	9,06
Tannée à 0,30 d'eau.	0,336	0,007	3,17	6,34
Tourbe parfaitement sèche, à 0,05 de cendres.	0,58	0,02	5,68	11,36
Tourbe à 0,30 d'eau.	0,406	0,014	3,98	7,96
Charbon de tourbe à 0,20 de cendres.	0,80	0,00	7,10	14,20
Houille moyenne à 0,02 de cendres. .	0,82	0,04	8,35	16,70
Coke à 0,05 de cendres.	0,95	0,00	8,44	16,88
Coke à 0,125 de cendres.	0,875	0,00	7,77	15,54

537. Volume de gaz qui passe par la cheminée d'un foyer. Le volume de l'acide carbonique pur étant, à la même température et à la même pression, égal à celui de l'oxygène qui l'a formé, si le combustible ne contenait que du carbone, le volume de gaz qui passerait par la cheminée serait égal au volume d'air qui arrive sur le foyer, ramené à la température de la cheminée; mais il passe aussi de la vapeur d'eau qui provient :

1° De l'eau contenue dans le combustible, et qui donne, par kilogramme, un volume de $1^{mc},699$ de vapeur à 100° (494), lequel, ramené fictivement à 0°, devient $\frac{1,699}{1 + 0,367} = 1^{mc},24$ (483).

2° De l'oxygène et de l'hydrogène dans les proportions convenables pour faire de l'eau ; ainsi 1 kilog. de bois très sec contenant ces deux gaz dans la proportion de 46 p. 100 d'eau (510) donnera un volume de vapeur, ramené fictivement à 0°, égal à $1,24 \times 0,46 = 0^{mc},57$. Si le bois était à 25 p. 100 d'eau, ce volume de vapeur à 0° serait $1,24\,(0,25 + 0,46 \times 0,75) = 0^{mc},74$;

3° De l'hydrogène en excès. 1 kilog. d'hydrogène exigeant 8 kilog. d'oxygène pour se brûler, c'est-à-dire pour se convertir en eau (536), il en résulte que chaque kilogramme d'oxygène brûlé donnera $1^{kg},125$ de vapeur d'eau, ou $1,24 \times 1,125 = 1^{mc},4$ environ de vapeur ramenée fictivement à 0°. Comme 1 kilog. d'oxygène à 0° et sous la pression $0^{m},76$ occupe un volume de $0^{mc},70$ (465), il en résulte que chaque kilogramme d'oxygène converti en vapeur donnera une augmentation de volume à 0° de $1,4 - 0,7 = 0^{mc},7$; ce qui fait voir que l'augmentation de volume est égale au volume de l'oxygène brûlé, ou encore que le volume de vapeur produit est double de celui de l'oxygène.

Le bois parfaitement sec contenant 0,01 d'hydrogène en excès, l'augmentation totale de volume due à la vapeur d'eau, ramenée fictivement à 0°, est alors, par kilogramme de bois :

$$0,57 + 0,01 \times 8 \times 0,7 = 0^{mc},63.$$

Pour le bois à 0,25 d'eau, cette augmentation est :

$$0{,}74 + 0{,}0075 \times 8 \times 0{,}7 = 0^{mc}{,}78.$$

La tannée donne à peu près la même augmentation de volume que le bois dans les mêmes conditions de dessiccation ; ainsi pour celle qui est à 0,30 d'eau, l'augmentation totale due à la vapeur d'eau est, par kilogramme de tannée :

$$1{,}24\,(0{,}30 + 0{,}46 \times 0{,}70) + 0{,}007 \times 8 \times 0{,}7 = 0^{mc}{,}81.$$

Pour la tourbe desséchée contenant 0,35 d'hydrogène et d'oxygène dans les proportions nécessaires pour faire de l'eau, plus 0,02 d'hydrogène en excès, cette augmentation est :

$$1{,}24 \times 0{,}35 + 0{,}02 \times 8 \times 0{,}7 = 0^{mc}{,}55.$$

Pour la tourbe à 0,30 d'eau, cette augmentation devient :

$$1{,}24\,(0{,}30 + 0{,}35 \times 0{,}70) + 0{,}02 \times 0{,}70 \times 8 \times 0{,}7 = 0^{mc}{,}75.$$

Pour une houille moyenne contenant 0,12 d'hydrogène et d'oxygène dans les proportions convenables pour faire de l'eau, et 0,04 d'hydrogène en excès, on a pour cette augmentation :

$$1{,}24 \times 0{,}12 + 0{,}04 \times 8 \times 0{,}7 = 0^{mc}{,}37.$$

538. *Tableau donnant, pour 1 kilogramme de combustible* (1[er] tableau, p. 668) : 1° *le volume d'air à 0° qui passe par le foyer pour opérer la combustion d'un kilogramme de ces combustibles ;* 2° *l'augmentation de volume due à la vapeur d'eau provenant des causes qui viennent d'être citées, cette vapeur étant ramenée fictivement à 0° ;* 3° *le volume total de gaz qui passe par la cheminée ;* 4° *le volume total de gaz qui passe par la cheminée, en faisant le coefficient de dilatation des gaz égal à* 0,00367 (483), *et la température* $t = 300°$ (*température ordinaire des gaz dans la cheminée*), *ce qui donne* $1 + at = 2{,}1$.

DÉSIGNATION DES COMBUSTIBLES.	AIR froid.	AUGMENTATION due à la vapeur à 0°.	VOLUME DE GAZ dans la cheminée, la température dans la cheminée étant	
			t = valeur quelconque.	t = 300°.
	m. c.	m. c.	m. c.	m. c.
Bois parfaitement desséché. . .	9,42	0,63	10,05 $(1+at)$	21,11
Bois ordinaire à 0,25 d'eau. . .	7,06	0,78	7,84 $(1+at)$	16,46
Charbon de bois à 0,07 de cendres et 0,07 d'eau.	15,28	0,00	15,28 $(1+at)$	32,09
Tannée sèche.	9,06	0,63	9,69 $(1+at)$	20,35
Tannée à 0,30 d'eau.	6,34	0,81	7,15 $(1+at)$	15,02
Tourbe parfaitement sèche, à 0,05 de cendres.	11,36	0,55	11,91 $(1+at)$	25,01
Tourbe à 0,30 d'eau.	7,96	0,75	8,71 $(1+at)$	18,29
Charbon de tourbe à 0,20 de cendres.	14,20	0,00	14,20 $(1+at)$	29,82
Houille moyenne à 0,02 de cendres.	16,70	0,37	17,07 $(1+at)$	35,85
Coke à 0,04 de cendres.	17,06	0,00	17,06 $(1+at)$	35,83
Coke à 0,15 de cendres.	15,10	0,00	15,10 $(1+at)$	31,71

Les nombres de ce tableau supposent que tout le combustible est brûlé; mais comme dans la pratique une partie du combustible tombe de la grille et échappe à la combustion, ainsi pour les houilles on obtient de 10 à 20 p. 100 de résidu, on doit considérer ces nombres comme étant des maximums qui donneront toujours des résultats suffisants dans le calcul des dimensions de la cheminée. Des expériences faites à Wesserling, sur une même chaudière à vapeur, ont donné un volume de gaz sortant par la cheminée égal à $6(1+at)$ pour le bois, et $16(1+at)$ pour la houille à 0,16 de résidu (521).

539. *Au tableau de la page* 723 *nous consignons :*

1° La puissance calorifique C des combustibles, en ne tenant compte que de la chaleur développée par la combustion du carbone, dont la puissance calorifique est 8080, et de celle développée par la combustion de l'hydrogène en excès, dont la puissance calorifique est de 34462. L'oxygène que contient le combustible (oxygène et azote, en négligeant celui-ci qui est en faible quantité) se combinant avec le 1/8 de son poids d'hydrogène pour faire de l'eau, l'hydrogène en excès est l'hydrogène signalé par l'analyse moins le 1/8 de l'oxygène.

2° Le poids q de la vapeur fournie par l'eau provenant de la combinaison de l'hydrogène en excès avec l'oxygène, et de celle fournie par l'eau hygrométrique que contiennent les combustibles.

3° La valeur de $E=C-p$ obtenue en retranchant de la puissance calorifique C la perte de chaleur $p=550\times q$ due à la chaleur latente de vaporisation de l'eau, chaleur latente que nous supposons être de 550 (490).

E est la chaleur utilisée pour élever à la température T_2, T_1 ou T les gaz provenant de la combustion, et $C-(p+p')$ est la puissance calorifique effective proprement dite. La perte p devient nulle si la fumée n'arrive pas à la cheminée à une certaine température, parce qu'alors elle est restituée par suite de la condensation de la vapeur. Si la fumée ne se dégage qu'entièrement refroidie, la perte p' devient nulle à son tour.

Pour l'hydrogène, comme 1 kilog. de ce gaz produit 9 kilog. d'eau (537), quoiqu'il n'y ait pas d'eau hygrométrique, on a $q=9$, $p=550\times 9=4950$, et $E=34462-4950=29512$. Cela a son importance toutes les fois qu'on fait usage de combustibles riches en hydrogène.

4° a_1 et a, nombre d'unités de chaleur nécessaires pour élever de 1° la température des produits de la combustion, selon que l'air est entièrement utilisé ou que la moitié échappe à la combustion.

5° $T_1=E:a_1$ et $T=E:a$, températures dans le foyer dans les deux cas du 4°, en supposant qu'il n'y a aucune déperdition de chaleur.

6° La perte $p'=E\,\frac{t'}{T}$, en unités de chaleur, est due à la température des gaz qui s'échappent dans la cheminée; les valeurs de p' du tableau supposent $t'=300°$, et que la moitié de l'air échappe à la combustion.

Calcul des quantités précédentes pour chaque combustible en particulier.

1° *Carbone brûlé par de l'oxygène entièrement utilisé.*

Oxygène nécessaire à la combustion de 1 kilog. de carbone (536) $72,73:27,27=2^k,67$.

Poids de l'acide carbonique formé $1+2,67=3^k,67$.

La chaleur spécifique de l'acide carbonique étant 0,2164 (488), le nombre a_2 d'unités de chaleur nécessaire pour élever de 1° la température de ces $3^k,67$ d'acide carbonique est :

$$a_2=0,2164\times 3,67=0^u,79.$$

Carbone brûlé avec de l'air entièrement employé.

Supposant l'air composé en poids de 23 d'oxygène pour 77 d'azote, le poids d'azote résultant de la combustion de 1 kilog. de carbone est $2{,}67 \times 77 : 23 = 8^k{,}94$.

La chaleur spécifique de l'azote étant 0,244, on a :

$$a_1 = 0{,}79 + 0{,}244 \times 8{,}94 = 2^u{,}97.$$

Carbone brûlé avec de l'air dont la moitié échappe à la combustion.

$2^k{,}67$ d'oxygène et $8^k{,}94$ d'azote s'ajoutant aux gaz du cas précédent; la chaleur spécifique de l'oxygène étant 0,2182, on a :

$$a = 2{,}97 + 0{,}2182 \times 2{,}67 + 0{,}244 \times 8{,}94 = 5^u{,}73.$$

2° *Hydrogène brûlé par de l'oxygène entièrement utilisé.*

1 kilog. d'hydrogène donnant naissance à 9 kilog. de vapeur d'eau (536), et la chaleur spécifique de cette vapeur étant 0,475, on a :

$$a_2 = 0{,}475 \times 9 = 4^u{,}275.$$

Hydrogène brûlé par de l'air entièrement utilisé.

Le poids de l'azote qui se joint à la vapeur du cas précédent étant $8 \times 77 : 23 = 26^k{,}78$, on a :

$$a_1 = 4{,}275 + 0{,}244 \times 26{,}78 = 10^u{,}81.$$

Hydrogène brûlé par de l'air dont la moitié échappe à la combustion.

8 kilog. d'oxygène et $26^k{,}78$ d'azote s'ajoutant aux gaz du cas précédent, on a :

$$a = 10{,}81 + 0{,}2182 \times 8 + 0{,}244 \times 26{,}78 = 19^u{,}09.$$

3° *Oxyde de carbone brûlé par de l'oxygène entièrement employé.*

L'oxyde de carbone étant composé de 0,4286 de carbone et de 0,5714 d'oxygène, d'après le 1°, le poids d'acide carbonique formé par la combustion de 1 kilog. de cet oxyde est $3{,}67 \times 0{,}4286 = 1^k{,}57$, et par suite on a :

$$a_2 = 0{,}2164 \times 1{,}57 = 0^u{,}34.$$

Oxyde de carbone brûlé par de l'air entièrement utilisé.

Comme, pour un même poids de carbone, il entre deux fois plus d'oxygène dans l'acide carbonique CO^2 que dans l'oxyde de carbone CO, le poids d'oxygène pris à l'air est $0^k{,}5714$; le poids d'azote qui se joint à l'acide carbonique du cas précédent est alors $0{,}5714 \times 77 : 23 = 1^k{,}91$, et par suite on a :

$$a_1 = 0{,}34 + 0{,}244 \times 1{,}91 = 0^u{,}81.$$

Oxyde de carbone brûlé par de l'air dont la moitié échappe à la combustion.

$0^k{,}5714$ d'oxygène et $1^k{,}91$ d'azote s'ajoutant aux gaz du cas précédent, on a :

$$a = 0{,}81 + 0{,}2182 \times 0{,}5714 + 0{,}244 \times 1{,}91 = 1^u{,}40.$$

En résumé, les valeurs de a_2, a_1 et a sont respectivement :

Pour le carbone.	$0^u{,}79$	$2^u{,}97$	$5^u{,}73$
Pour l'hydrogène	4 ,275	10 ,81	19 ,09
Pour l'oxyde de carbone.	0 ,34	0 ,81	1 ,40

Par suite on a (508) :

Pour le carbone . . . .
$T_2 = 8080 : 0,79 = 10228°$
$T_1 = 8080 : 2,97 = 2721$
$T = 8080 : 5,73 = 1410$

Pour l'hydrogène . . . .
$T_2 = 29512 : 4,275 = 6903$
$T_1 = 29512 : 10,81 = 2730$
$T = 29512 : 19,09 = 1546$

Pour l'oxyde de carbone . . . .
$T_2 = 2403 : 0,34 = 7068$
$T_1 = 2403 : 0,81 = 2967$
$T = 2403 : 1,40 = 1716$

Pour le *bois parfaitement sec*, renfermant 0,50 de carbone, 0,01 d'hydrogène, 0,46 d'eau, 0,01 d'azote et 0,02 de cendres (510), a_1 et a ont pour valeurs les sommes suivantes :

	Air entièrement utilisé.	Air utilisé au 1/2.
Carbone	$0,50 \times 2,97 = 1,485$	$0,50 \times 5,73 = 2,865$
Hydrogène	$0,01 \times 10,81 = 0,1081$	$0,01 \times 19,09 = 0,1909$
Eau	$0,46 \times 0,475 = 0,2185$	$0,46 \times 0,475 = 0,2185$
Azote	$0,01 \times 0,244 = 0,00244$	$0,01 \times 0,244 = 0,00244$
Cendres	$0,02 \times 0,20 = 0,004$	$0,02 \times 0,20 = 0,004$
	$a_1 = 1,81804$	$a = 3,28084$
	Soit $a_1 = 1,82$	Soit $a = 3,28$

$C = 8080 \times 0,50 = 34462 \times 0,01 = 4385$ étant la puissance calorifique du bois parfaitement sec (510), comme 0,01 d'hydrogène donne 0,09 d'eau par sa combinaison avec l'oxygène, et que déjà le bois contient 0,46 d'eau, on a $q = 0,09 + 0,46 = 0,55$, et $p = 550 \times 0,55 = 303$. Par suite, $E = C - p = 4385 - 303 = 4082$, $T_1 — 4082 : 1,82 = 2243°$ et $T = 4082 : 3,28 = 1245°$. Pour le cas où la moitié de l'air échappe à la combustion, et où la température dans la cheminée est $t' = 300°$, on a $p' = 4082 \times 300 : 1245 = 984$.

Pour le *bois renfermant* 0,25 *d'eau hygrométrique*, on a :

$a_1 = 1,82 \times 0,75 + 0,475 \times 0,25 = 1,48$, $a = 3,28 \times 0,75 + 0,475 \times 0,25 = 2,58$, $C = 4385 \times 0,75 = 3289$, $q = 0,55 \times 0,75 + 0,25 = 0,66$, $p = 550 \times 0,66 = 363$, $E = 3289 - 363 = 2926$, $T_1 = 2926 : 1,48 = 1977°$, $T = 2926 : 2,58 = 1134°$ et $p' = 2926 \times 300 : 1134 = 774$.

C'est en opérant ainsi que nous avons obtenu tous les résultats du tableau suivant.

Composition des autres combustibles de ce tableau :

Charbon de bois : carbone 0,86, eau, 0,07, cendres 0,07;

Tourbe sèche : carbone 0,47, hydrogène libre 0,013, eau 0,427, cendres 0,09; c'est la composition moyenne des six premières tourbes analysées par M. de Marsilly (page 691);

Même tourbe à 0,30 *d'eau hygrométrique :* carbone $0,47 \times 0,70 = 0,329$, hydrogène libre $0,013 \times 0,70 = 0,0091$, eau de composition $0,427 \times 0,70 = 0,2989$, eau hygrométrique 0,30, cendres $0,09 \times 0,70 = 0,063$;

Houille moyenne : carbone 0,82, hydrogène libre 0,04, hydrogène et oxygène supposés en eau 0,11, cendres 0,03; c'est la composition moyenne du flenu de Mons, très convenable pour les grilles, d'après les analyses de M. de Marsilly (page 689). La houille a été desséchée avant l'analyse (page 687), et nous négligeons la faible quantité d'azote, ou plutôt nous la confondons avec l'oxygène qui forme les 0,11 d'eau;

Coke : carbone 0,95, cendres 0,05;

Coke : carbone 0,875, cendres 0,125.

Tableau des valeurs des divers éléments définis page 720.

DÉSIGNATION des combustibles.	PUISSANCE calorifique C.	VALEUR DE E.	POIDS DE VAPEUR q.	VALEUR de		TEMPÉRATURE dans le foyer.		PERTE $p+p'$.
				a_1	a	T_1	T	
			kil.					
Carbone.	8080	8080	0,00	2,97	5,73	2721°	1410°	0+1719= 1719
Hydrogène.	34462	29512	0,00	10,81	19,09	2730	1546	4950+5727=10677
Oxyde de carbone. . . .	2403	2403	0,00	0,81	1,40	2967	1716	0+ 420= 420
Bois desséché à 140°. . .	4385	4082	0,55	1,82	3,28	2243	1245	303+ 984= 1287
Bois à 0,25 d'eau.	3289	2926	0,66	1,48	2,58	1977	1134	363+ 774= 1137
Charbon de bois à 0,07 de cendres et 0,07 d'eau	6949	6910	0,07	2,60	4,98	2657	1388	39+1494= 1533
Tourbe sèche à 0,09 de cendres.	4246	3947	0,544	1,76	3,16	2243	1249	299+ 948= 1247
Tourbe à 0,30 d'eau. . .	2972	2598	0,68	1,37	2,35	1896	1106	374+ 705= 1079
Houille moyenne.	8004	7745	0,47	2,93	5,52	2643	1403	259+1656= 1915
Coke à 0,05 de cendres.	7676	7676	0,00	2,83	5,45	2172	1408	0+1636= 1636
Coke à 0,125 de cendres.	7070	7070	0,00	2,62	5,04	2698	1403	0+1512= 1512

Ce tableau montre que pour les combustibles ordinairement employés la chaleur entraînée dans la cheminée est environ le 1/4 de la chaleur totale développée par ces combustibles.

CHEMINÉES

540. Mouvement de l'air chaud dans un tuyau vertical AB entièrement ouvert à ses extrémités. Supposant nulle la perte de charge $P-p$ due : 1° à l'entrée de l'air extérieur dans l'ouverture C du tuyau; 2° au coude B; 3° au frottement de l'air contre les parois du circuit, on a (351) :

Fig. 127.

$$P=p \quad \text{et} \quad u=\sqrt{2gP\frac{\delta}{\delta'}}.$$

Les lettres ont les mêmes significations qu'au n° 351; ainsi u est la vitesse d'accès de l'air froid dans l'orifice inférieur C.

Dans le cas dont il s'agit, $P\frac{\delta}{\delta'}$ est la hauteur d'une colonne d'air extérieur égale à la différence entre la hauteur H du tuyau, et cette même hauteur en air

chaud ramenée à la température extérieure; ainsi (483) :

$$P\frac{\delta}{\delta'} = H - H\frac{1+a\theta}{1+at} = \frac{Ha(t-\theta)}{1+at}. \qquad (a)$$

Soit, pour $\theta = 0$:

$$P\frac{\delta}{\delta'} = H - H\frac{1}{1+at} = \frac{Hat}{1+at}. \qquad (b)$$

H hauteur du tuyau vertical AB dans lequel circule l'air chaud;
$a = 0{,}004$ coefficient de dilatation de l'air chaud (350);
t température moyenne de l'air dans le tuyau, nous supposerons que t est la température de l'air en tous les points du tuyau;
θ température de l'air extérieur.

Par suite on a :

$$u = \sqrt{\frac{2gHa(t-\theta)}{1+at}}. \qquad (A)$$

Supposant $\theta = 0$, cette formule peut être mise sous la forme :

$$u = \sqrt{2gH} \times \sqrt{\frac{at}{1+at}}. \qquad (B)$$

Ce qui montre que la vitesse d'accès, la seule utile à considérer ici, puisque l'effet utile des cheminées consiste toujours dans l'appel de l'air extérieur, est égale au produit de la vitesse $\sqrt{2gH}$ due à la hauteur H, par un facteur toujours moindre que l'unité, qui augmente avec la température et devient 1 quand $t = \infty$. Pour les valeurs successives de t :

50° 100° 150° 200° 250° 300° 350° 400° 500° 1000° 1500° 2000° ∞°,

celles correspondantes du facteur $\sqrt{\frac{at}{1+at}}$ sont en effet :

0,409 0,535 0,613 0,667 0,708 0,739 0,764 0,785 0,805 0,895 0,926 0,943 1,000

Ces chiffres montrent que, pour une même hauteur H, la vitesse d'accès u de l'air froid augmente très lentement avec la température t, surtout à partir de 250 à 300°, valeurs entre lesquelles on maintient ordinairement la température dans les cheminées d'usines.

Ce qui précède suppose que l'air qui remplit le tuyau vertical n'a éprouvé, en s'échauffant, que la variation de densité résultant du changement de température. Mais comme ordinairement l'échauffement résulte de la combustion, on a pour la différence exprimée par la formule (a) :

$$H - H\Delta\frac{1+a\theta}{1+at} = \frac{H[1-\Delta+a(t-\Delta\theta)]}{a+at}, \qquad (a')$$

ou en supposant $\theta = 0$:

$$H - H\Delta\frac{1}{1+at} = \frac{H(1-\Delta+at)}{1+at}. \qquad (b')$$

Δ densité tabulaire du gaz produit.

Supposant que la totalité de l'air est employée à la combustion, la densité de l'acide carbonique étant 1,529 et celle de l'azote 0,971 (465), on a $\Delta = 1{,}529 \times 0{,}21 + 0{,}971 \times 0{,}79 = 1{,}088$. Si, comme cela a lieu ordinairement, la moitié de l'air échappe à la combustion, on a $\Delta = \frac{1 + 1{,}088}{2} = 1{,}044$. Dans ces deux hypothèses, l'expression (b') devient respectivement :

$$\frac{H(at - 0{,}088)}{1 + at} \quad \text{et} \quad \frac{H(at - 0{,}044)}{1 + at}.$$

La température t' que doivent avoir ces gaz pour que le tirage soit le même qu'avec de l'air à la température t, s'obtient en remplaçant t par t' dans ces dernières expressions et en les égalant au dernier membre de l'équation (b), ce qui donne :

$$\frac{H(at' - 0{,}088)}{1 + at'} = \frac{Hat}{1 + at}; \quad \text{d'où} \quad t' = 22 + 1{,}088t,$$

et

$$\frac{H(at' - 0{,}044)}{1 + at'} = \frac{Hat}{1 + at}; \quad \text{d'où} \quad t' = 11 + 1{,}044t.$$

Ainsi lorsque l'air n'est qu'à moitié brûlé, le tirage produit par de l'air à $t = 300°$, par exemple, ne serait obtenu pour les gaz résultant de la combustion qu'à la température $t' = 11 + 1{,}044 \times 300 = 324°$. La faible augmentation de 24° qui en résulte dans la température n'ayant, d'après ce qui a été établi ci-dessus, qu'une très légère influence sur le tirage, comme d'un autre côté les gaz qui se dégagent des foyers contiennent toujours de la vapeur d'eau provenant de l'eau que renferme le combustible et de celle qu'il produit, et que la densité de cette vapeur n'est que de 0,621, ce qui tend à diminuer l'effet de l'acide carbonique sur le tirage, on peut dans la pratique admettre que les formules (a), (b), (A), (B), relatives à l'air, s'appliquent aussi aux gaz résultant de la combustion.

541. Mouvement de l'air chaud dans un canal formé de plusieurs tuyaux verticaux parcourus successivement. La formule (a) devient, dans ce cas :

$$P\frac{\delta}{\delta'} = \pm \frac{Ha(t - \theta)}{1 + at} \pm \frac{H'a(t' - \theta)}{1 + at'} \pm \frac{H''a(t'' - \theta)}{1 + at''} \pm \ldots$$

H, H', H'' ... hauteurs verticales des tuyaux successifs;
t, t', t'' ... températures de l'air dans les tuyaux successifs.
Le signe + s'applique à tout tuyau ascendant, et le signe — à tout tuyau descendant.

La formule (A) de la vitesse d'accès de l'air est alors :

$$u = \sqrt{2ga\left[\pm \frac{H(t - \theta)}{1 + at} \pm \frac{H'(t' - \theta)}{1 + at'} \pm \frac{H''(t'' - \theta)}{1 + at''} \pm \ldots\right]}.$$

Voir une application de cette formule à l'article SÉCHAGE (701).

542. Cheminées de générateurs à vapeur fixes. L'appel d'air extérieur provenant de la température de l'air brûlé et de la hauteur de la cheminée porte le nom de *tirage*. Dans la pratique, le tirage tel qu'il est formulé au numéro précédent est diminué, dans une très grande proportion, par la résistance de la grille, les changements brusques ou continus de section et de direction du circuit, et par le frottement des gaz contre les parois de ce circuit.

Quoiqu'on puisse supposer, ce qui a à peu près lieu dans la pratique, que le circuit a partout la même section, depuis l'ouverture du cendrier jusqu'au sommet de la cheminée et même entre les barreaux de la grille, on conçoit que les phénomènes qui se produisent dans la transformation, l'échauffement, le refroidissement et le mouvement des gaz, sont trop différents d'un fourneau à l'autre, et toujours trop compliqués, pour qu'on puisse arriver, par de simples considérations théoriques, à une expression analytique de la diminution de tirage dont il vient d'être question, et, par suite, à une expression analytique de la section à donner à une cheminée pour obtenir un effet déterminé. On est obligé d'avoir recours à une règle empirique, qui doit nécessairement se modifier selon les circonstances différentes qui se présentent dans la pratique.

Pour les générateurs à vapeur fixes, disposés suivant la méthode ordinaire, Péclet a reconnu, en réunissant un grand nombre de renseignements et les résultats de quelques expériences, la température t dans la cheminée étant de 300°, la section libre entre les barreaux de la grille égale à la section de la cheminée, et la consommation de houille 1 kilog. par décimètre carré de surface totale de grille et par heure, qu'on avait à peu près pour les hauteurs de cheminées :

$$H = 10^{m}, \quad u = 0{,}18v = 0{,}18\sqrt{\frac{2gHat}{1+at}} = 0{,}18 \times 10{,}34 = 1{,}86$$

$$H = 20^{m}, \quad u = 0{,}17v = 0{,}17\sqrt{\frac{2gHat}{1+at}} = 0{,}17 \times 14{,}63 = 2{,}49$$

$$H = 30^{m}, \quad u = 0{,}16v = 0{,}16\sqrt{\frac{2gHat}{1+at}} = 0{,}16 \times 17{,}92 = 2{,}87$$

u vitesse réelle d'accès de l'air froid ;

$v = \sqrt{\frac{2gHat}{1+at}}$ vitesse d'accès de l'air froid dans le cas de la formule (B) du numéro précédent.

Le volume d'air froid appelé par heure et par décimètre carré de section du canal ou de la cheminée étant représenté par $u \times 0{,}01 \times 3600 = u \times 36$, il est respectivement pour les valeurs 10^{m}, 20^{m}, 30^{m}, de H :

$$1{,}86 \times 36 = 66^{mc},96, \quad 2{,}49 \times 36 = 89^{mc},64, \quad 2{,}87 \times 36 = 103^{mc},32.$$

En divisant ces valeurs par le volume d'air qu'exige la combustion de 1 kilog. du combustible employé (536), on a le poids de ce combustible brûlé par heure et par décimètre carré de section de la cheminée.

S'il s'agit de houille, admettant avec Péclet, et afin de ne pas se trouver en défaut, que 1 kilog. exige pour sa combustion 18 mètres cubes d'air à moitié brûlé (536), le poids de ce combustible brûlé par heure et par décimètre carré de section de la cheminée est respectivement pour les hauteurs précédentes :

$$\frac{66{,}96}{18} = 3^{k}{,}72, \quad \frac{89{,}64}{18} = 4^{k}{,}98, \quad \frac{103{,}32}{18} = 5^{k}{,}74.$$

Ces nombres diffèrent peu de ceux adoptés par les ingénieurs. En les employant, on ne peut qu'avoir un excès des tirages, avantageux dans beaucoup de cas, et que toujours on peut annuler à l'aide du registre.

Ce qui précède suppose la proportionnalité de la section de la cheminée à la consommation totale de combustible. Cette hypothèse est admissible; car les résistances qui proviennent de la grille et des changements de direction du courant n'éprouvent que peu de variations, et celles qui résultent du frottement n'ont en général que peu d'influence sur la résistance totale.

Selon qu'une cheminée est carrée ou circulaire, le rapport de sa section au périmètre de cette section est :

$$\frac{C^2}{4C} = \frac{C}{4} \quad \text{ou} \quad \frac{\pi D^2}{4\pi D} = \frac{D}{4}.$$

C côté de la section carrée;
D diamètre de la section circulaire.

Ce qui montre que ce rapport est le même pour la section qui est un carré que pour la section circulaire inscrite dans ce carré. A section égale $\left(C^2 = \frac{\pi D^2}{4}\right)$, comme on a $C < D$, le rapport précédent est moindre pour la section carrée que pour la section circulaire, et l'on voit que sous le rapport du tirage *on doit donner la préférence aux cheminées circulaires sur les cheminées carrées*. Mais la différence de résistance est trop faible pour qu'on ne donne pas la même section aux deux formes de cheminées.

Les cheminées octogonales, quoique moins recommandables que les cheminées rondes, doivent être préférées aux cheminées carrées.

Problème. Quel côté C ou quel diamètre D doit-on donner à une cheminée de 30 mètres de hauteur pour brûler 100 kilog. de houille par heure?

La consommation étant de $5^{k}{,}74$ par heure et par décimètre carré, la section de la cheminée en mètres carrés est 100 : 5,74, et par suite on a :

$$C^2 = \frac{100}{574} \quad \text{ou} \quad C = 0^{m}{,}418 \quad \text{et} \quad \frac{\pi D^2}{4} = \frac{100}{574} \quad \text{ou} \quad D = 0^{m}{,}471.$$

C'est ainsi que nous avons calculé les valeurs de C et de D du tableau suivant. D'après les relations entre *u* et *v* admises ci-dessus pour les

hauteurs 10ᵐ, 20ᵐ et 30ᵐ, pour les hauteurs 15ᵐ, 25ᵐ et 35ᵐ nous avons supposé respectivement $u = 0,175v$, $u = 0,165v$ et $u = 0,155v$, relations qui conduisent aux poids de houille brûlés par heure et par décimètre carré de cheminée $4^k,44$, $5^k,40$ et $6^k,00$.

543. ***Tableau des valeurs du côté* C *et du diamètre* D *des cheminées de générateurs fixes ordinaires, pour diverses consommations totales de houille par heure, et pour les hauteurs habituelles* H *de cheminées.***

HOUILLE BRULÉE par heure	H=10ᵐ		H=15ᵐ		H=20ᵐ		H=25ᵐ		H=30ᵐ		H=35ᵐ	
	C	D	C	D	C	D	C	D	C	D	C	D
kil.	mèt.	mèt.	mèt.	mèt.	mèt.	mèt.	mèt.	mèt.	mèt.	mèt.	mèt.	mèt.
15	0,201	0,227	0,184	0,208	0,174	0,196	0,167	0,189	0,162	0,183	0,159	0.179
20	0,232	0,262	0,213	0,240	0,201	0,227	0,193	0,218	0,187	0,211	0.183	0,207
25	0,260	0,293	0,238	0,268	0,225	0,253	0,216	0,243	0,209	0,236	0,205	0,231
30	0,284	0,321	0,260	0,294	0,246	0,277	0,236	0,266	0,229	0,258	0,224	0,253
35	0,307	0,347	0,281	0,317	0,266	0,300	0,255	0,288	0,247	0,279	0.242	0,273
40	0,328	0,370	0,301	0,339	0,284	0,320	0,273	0,308	0,264	0,298	0,259	0,292
45	0,348	0,393	0,319	0,360	0,301	0,340	0,289	0,326	0,280	0,316	0.274	0,310
50	0,367	0,414	0,336	0,379	0,317	0,358	0,305	0,344	0,296	0,334	0,289	0,326
60	0,402	0,454	0,368	0,415	0,347	0,392	0,334	0,377	0,324	0,365	0.317	0.357
70	0,434	0,490	0,397	0,448	0,375	0.423	0,360	0,407	0,350	0,394	0.342	0,386
80	0,464	0,524	0,425	0,479	0,401	0,453	0,385	0,435	0,374	0,422	0,366	0,412
90	0,492	0,555	0,451	0,509	0,426	0,480	0,409	0,461	0,396	0,447	0.388	0.437
100	0,519	0,586	0,475	0,536	0,449	0,506	0,431	0,486	0,418	0,471	0.409	0.461
110	0,544	0,614	0,498	0,562	0,470	0,531	0,452	0,510	0,438	0,494	0.429	0.484
120	0,568	0,641	0,520	0,587	0,491	0,554	0,472	0,532	0,457	0,516	0,448	0.505
130	0,592	0,667	0,541	0,611	0,511	0,577	0,491	0,554	0,476	0,537	0,466	0,526
140	0,614	0,693	0,562	0,634	0,531	0,599	0,510	0,575	0,494	0,558	0.484	0,546
150	0,635	0,717	0,582	0,656	0,549	0,620	0,527	0,595	0,512	0,577	0,500	0,565
160	0,656	0,740	0,601	0,678	0,567	0,640	0,545	0,615	0,528	0,596	0,517	0,583
170	0,676	0,763	0,619	0,699	0,585	0,660	0,561	0,634	0,545	0,615	0,533	0,601
180	0,696	0,785	0,637	0,719	0,602	0,679	0,578	0,652	0,560	0,632	0,548	0,618
190	0,715	0,807	0,655	0,739	0,618	0,697	0,594	0,670	0,576	0,650	0.563	0,635
200	0,734	0,828	0,672	0,758	0,634	0,715	0,609	0,687	0,591	0,667	0,578	0,652

La section des carneaux ne doit pas être moindre que celle de la cheminée.

La fumée subissant un plus grand refroidissement dans une cheminée en métal que dans une cheminée en briques ou en poterie, le tirage est moindre dans le premier cas que dans le second; mais la diminution est trop faible pour qu'on augmente la section, que les constructeurs font très souvent, au contraire, de 1/5 à 1/4 moindre pour les cheminées en métal que pour celles en briques.

544. Calcul de la section des cheminées. La règle si simple du numéro précédent ne s'applique qu'aux cheminées des générateurs fixes dans les conditions ordinaires, quand la température $t = 300°$ environ, et qu'on brûle à peu près 1 kilog. de houille par heure et par décimètre carré de surface de grille. Pour les cheminées de foyers quelconques, établis en dehors des conditions précédentes, on est obligé d'avoir recours à la règle générale suivante.

La formule (a) relative aux conduites d'air (351), appliquée au cas des cheminées, devient, en remplaçant $\sqrt{2gP\frac{\delta}{\delta'}}$ par $\sqrt{\frac{2gHat}{1+at}}$ du

n° 540 :

$$u = \sqrt{\frac{2gHat}{1+at}} \times \sqrt{\frac{1}{1+G+N(1+at)^2+\frac{\varphi L}{D}(1+at)^2}}. \quad (1)$$

Les lettres ont les mêmes significations qu'aux n°s 351 et 540;

G coefficient de la perte de charge Gp due à la grille; nous supposons que G contient le coefficient A dû à l'entrée de l'air dans le canal, A ne pouvant être que très faible (351);

$N(1+at)^2$ coefficient de la perte de charge due aux coudes; cette perte étant proportionnelle au carré de la vitesse, la valeur de N du n° 351 doit ici être multipliée par le carré $(1+at)^2$ du volume que prend l'unité de volume à 0° en passant à la température t;

$\frac{\varphi L}{D}(1+at)^2$ coefficient de la perte de charge due au frottement contre les parois du canal; L est la longueur du développement de l'axe du canal, depuis l'ouverture du cendrier jusqu'au sommet de la cheminée.

Représentant la somme de ces trois coefficients par R, la formule précédente devient :

$$u = \sqrt{\frac{2gHat}{1+at}} \times \sqrt{\frac{1}{1+R}}.$$

Pour les générateurs fixes ordinaires, aux hauteurs 10m, 20m et 30m de cheminées, on a respectivement (542) :

$$0{,}18 = \sqrt{\frac{1}{1+R}} \qquad 0{,}17 = \sqrt{\frac{1}{1+R}} \qquad 0{,}16 = \sqrt{\frac{1}{1+R}};$$

d'où :

$$R = 29{,}86 \qquad R = 33{,}60 \qquad R = 38{,}06.$$

En comparant les dimensions d'un grand nombre de générateurs fixes, Péclet a trouvé que, pour les trois hauteurs précédentes de cheminées, les valeurs de $\varphi L : D$ sont sensiblement 1,50, 2,37 et 3,57. Comme il y a ordinairement $n = 8$ changements de direction à angle droit, en admettant que ces angles soient arrondis, on a (351) :

$$N = n\frac{i}{180} = 8 \times 0{,}5 = 4.$$

Supposant $(1+at)=2$, c'est-à-dire que la vitesse dans le circuit soit double de la vitesse d'accès, on a $N(1+at)^2 = 4 \times 4 = 16$. Comme d'un autre côté $\frac{\varphi L}{D}(1+at)^2$ devient pour les hauteurs respectives 10m, 20m, 30m :

$$1{,}50 \times 4 = 6{,}00 \qquad 2{,}37 \times 4 = 9{,}48 \qquad 3{,}57 \times 4 = 14{,}28,$$

les valeurs de G sont :

$$29{,}86-(16+6)=7{,}86 \quad 33{,}60-(16+9{,}48)=8{,}12 \quad 38{,}06-(16+14{,}28)=7{,}78.$$

Ces nombres, qui diffèrent peu entre eux et dont la moyenne est 7,92,

montrent que dans la pratique on peut prendre G = 8 pour le coefficient de perte de charge due à une grille quelconque. La formule (1) donne alors :

$$u^2 = \frac{2gHat}{1 + at} \times \frac{1}{9 + \left(\frac{\varphi L}{D}\right)(1 + at)^2}.$$

Comme on a aussi :

$$u = \frac{V}{S} = \frac{V}{C^2} \quad \text{ou} \quad u^2 = \frac{V^2}{C^4}.$$

V volume d'air froid appelé par seconde;
$S = C^2$ section de la cheminée, supposée carrée.

Égalant ces deux valeurs de u^2, il vient :

$$\frac{V^2}{C^4} = \frac{2gHat}{1 + at} \times \frac{1}{9 + \left(N + \frac{\varphi L}{C}\right)(1 + at)^2},$$

d'où

$$C^5 = \frac{V^2 \varphi L (1 + at)^3}{2gHat} + \frac{V^2(1 + at)[9 + N(1 + at)^2]}{2gHat} C.$$

Équation de la forme :

$$C^5 = \alpha + \beta C, \qquad (a)$$

et qu'on résout par approximation. Pour cela, on néglige d'abord α, et de l'équation $C^4 + \beta$ qui en résulte, on tire une première valeur de C; on remplace C par cette valeur dans le second membre de l'équation (a), qui donne une seconde valeur de C plus approchée que la première; cette seconde valeur, substituée à son tour dans le second membre de l'équation (a), en fournit une troisième plus approchée que la seconde, et en continuant ainsi de suite on obtient des valeurs de plus en plus approchées.

Exemple. Soient 50 kilog. le poids de houille à brûler par heure, $H = 15^m$ la hauteur de la cheminée, $t = 150°$ la température de la fumée, $L = 40^m$ le développement de l'axe de circuit, et $n = 10$ le nombre de changement de direction à angle droit arrondis. De ces données, on conclut $V = 18 \times 50 : 3600 = 0^{mc},25$, $N' = 10 \frac{90}{180} = 5$, $\varphi L = 0,024 \times 40 = 0,96$ (351), et l'on a, en faisant $a = 0,004$:

$$C^5 = 0,00139 + 0,0123C.$$

Négligeant d'abord 0,00139 et opérant comme il été indiqué ci-dessus, on obtient pour les valeurs successives de C :

$0^m,3330 \quad 0^m,3531 \quad 0^m,3562 \quad 0^m,3566,$

nombres qui montrent que dans la pratique on peut adopter la seconde valeur obtenue pour le côté de la cheminée, sauf à forcer d'une unité le

chiffre des centimètres et à supprimer les chiffres qui expriment des unités inférieures au centimètre; on fera ainsi $C = 0^m,36$ dans l'exemple précédent.

545. Cheminées communes à plusieurs foyers. Lorsqu'une cheminée sert pour plusieurs foyers, on fait sa section égale à la somme des sections des cheminées de tous les foyers en particulier ; la section ainsi obtenue est un peu grande, mais l'excès de tirage qui en résulte ne peut qu'être avantageux.

546. Construction de cheminées d'usines. Cheminées colossales. Les cheminées en cuivre sont promptement détruites à leur sommet, surtout quand on brûle de la houille. On préfère les cheminées en tôle à celles en fonte, parce qu'elles redoutent moins les refroidissements inégaux et subits, et que leur poids plus faible les rend plus faciles à élever.

Les cheminées de petites dimensions se font très souvent en tôle. On les recouvre extérieurement d'une couche de chaux ou de goudron de houille, pour les préserver de l'oxydation. Si l'on n'a pas à redouter une haute température, il y aura avantage à employer de la tôle couverte de zinc ou d'une couche de peinture avec un alliage pulvérulent de fer et de zinc.

Comme malgré la présence de l'enduit, la tôle s'oxyde très vite, il convient de limiter à 12 ou 15 mètres la hauteur des cheminées qui en sont construites, afin de pouvoir plus facilement vérifier leur état. L'épaisseur de la tôle varie de 4 à 7 millimètres. Les cheminées se montent sur le sol, et on les élève d'une seule pièce. Mises en place, elles coûtent de $0^f,75$ à $0^f,80$ le kilogramme.

Les cheminées métalliques sont toujours à section circulaire; mais pour les cheminées en briques la section est circulaire, carrée ou octogonale. Les cheminées rondes sont en général préférées, parce que, à section égale, le périmètre étant le moindre, elles donnent lieu à moins de refroidissement et de frottements, et exigent moins de matériaux pour leur construction.

Les cheminées en briques ont ordinairement de 20 à 30 mètres de hauteur. Il existe cependant des cheminées d'usines bien plus hautes, qu'on peut qualifier de colossales et de monumentales.

Aux États-Unis, à Fall-River (Massachusetts), on en a terminé une en 1890 qui a 105 mèt. de hauteur, 9 mèt. de diamètre à la base, $6^m,50$ au couronnement; le diamètre intérieur est le même partout: $3^m,30$. A East-Newark (État de New-Jersey), existe une cheminée de 100 mètres; il y est entré 1 700 000 briques, et elle a coûté 425 000 fr.

En France, on trouve à Croix (Nord) une cheminée achevée en 1889, qui mesure 105 mètres et même 112 avec les fondations, et enfin 123 avec le paratonnerre; son volume est de 2 530 mètres cubes; son poids de 5 000 000 de kilogrammes; il y est entré 1 200 000 briques. A Etaings (Loire), il y a une cheminée de 108 mètres, du sol au couronnement.

Mais l'Angleterre dépasse les chiffres précédents; elle possède en effet des cheminées atteignant des hauteurs de 112 mètres (à Bolton), 132 (à Glascow) et 138 mètres (à Glascow, Ecosse); c'est donc Glascow

qui possède la plus élevée, mais une autre cheminée, projetée à Halsbrüch, près de Freiberg (Saxe), doit atteindre 150 mètres, la hauteur de la cathédrale de Rouen, la moitié de celle de la tour Eiffel.

Ces cheminées ont le plus souvent pour objet de rejeter à une grande hauteur les gaz délétères provenant des fabriques de produits chimiques.

Quand les cheminées en briques sont basses, on peut les faire prismatiques à l'intérieur, et diminuer l'épaisseur des murailles par ressauts brusques apparents à l'extérieur; quand elles sont très élevées, on leur donne une forme pyramidale ou conique à l'intérieur ou à l'extérieur.

L'épaisseur des grandes cheminées d'usines est ordinairement de $0^m,22$, la longueur d'une brique, à la partie supérieure; quand les cheminées sont basses, cette épaisseur au sommet est très souvent réduite à $0^m,11$, la largeur d'une brique; le fruit intérieur est de $0^m,12$ à $0^m,18$ par mètre, et celui extérieur de $0^m,025$ à $0^m,035$; comme l'épaisseur de la maçonnerie diminue à mesure qu'on s'élève, afin de ne pas tailler les briques, on fait la cheminée pyramidale ou conique à l'extérieur, et l'on rachète le fruit intérieur par des ressauts brusques de $0^m,11$.

Que la cheminée soit conique ou pyramidale, la base se fait prismatique, et ordinairement à section carrée. Cette basse s'élève à environ $3^m,50$ ou $4^m,50$ au-dessus du sol, et elle descend à environ 2 mètres ou $2^m,50$ en contre-bas, pour former la chambre d'arrivée de la fumée; elle est établie sur un massif de béton de 1 à 2 mètres d'épaisseur, ayant un empatement de $0^m,25$ à $0^m,50$ tout autour des parements extérieurs de la base. Une ouverture pratiquée dans une face de la base, et fermée ordinairement par une murette en briques, permet d'entrer dans la cheminée en cas de nettoyage ou de réparations.

Lorsque la température de la fumée ne dépasse pas 300°, on peut faire les cheminées en briques ordinaires hourdées avec un mortier de chaux et de sable fin; le plâtre ne doit être employé que pour des températures inférieures à 100°. Si la température de la fumée atteint 500°, le parement inférieur de la cheminée, surtout à la partie inférieure, doit être en briques réfractaires hourdées avec de la terre à briques.

On construit maintenant les cheminées sans échafaudages extérieurs. L'ouvrier qui se tient à l'intérieur, place, au fur et à mesure qu'il s'élève, des traverses en bois dans des trous qu'il a réservés dans la maçonnerie, et sur ces traverses il dispose des planches sur lesquelles il se place pour travailler. A l'une des traverses est fixée une poulie sur laquelle passe une corde manœuvrée par un treuil fixé au bas de la cheminée. A l'extrémité libre de la corde est suspendu un plateau sur lequel des garçons placent les briques et le mortier pour les élever au compagnon qui construit la cheminée.

Le chapiteau de la cheminée est quelquefois en pierre de taille, et ordinairement en briques comme le reste de la cheminée. Dans ce dernier cas, pour éviter que les eaux pluviales ne pénètrent à travers la maçonnerie, qui serait ainsi détruite, on recouvre la face horizontale du chapiteau d'une plaque mince de fonte ou d'une épaisse feuille de tôle qui se replie de $0^m,10$ à $0^m,15$ en dedans et en dehors de la cheminée.

Tous les 0m,25 à 0m,30 de hauteur, le maçon scelle un crampon en fer dans la maçonnerie, à l'intérieur de la cheminée. Ces crampons forment une échelle, qui sert d'abord au maçon pour monter et descendre pendant l'exécution de la cheminée, puis par la suite pour les réparations et les nettoyages. Le temps nécessaire à l'exécution de 1 mètre cube de maçonnerie pour ces cheminées, de la base au sommet, est de 17 heures de briqueteur et 20 heures d'un manœuvre servant, environ.

A Paris, le prix du mètre cube de maçonnerie, pour cheminées, non compris rejointoiement, est de 70 à 80 francs pour la brique de Bourgogne, de 50 à 55 francs pour la brique de pays, et de 110 francs pour la brique réfractaire. Le prix du mètre superficiel de rejointoiement est de 0f,75.

Ces prix ne comprennent pas les fondations, qui s'exécutent ordinairement par attachement.

En ne fournissant pas les matériaux, les constructeurs de Paris élèvent les cheminées d'usines à raison de 10 à 15 francs de main-d'œuvre par mètre cube de maçonnerie de briques.

547. *Tableau des dimensions des cheminées adoptées par un grand établissement de construction de machines à vapeur.* L'épaisseur en haut est de 0m,11 dans toutes les cheminées (542).

	FORCE en chevaux.	CHEMINÉES RONDES, diamètre intérieur.		CHEMINÉES CARRÉES, côté à l'intérieur.		ÉPAISSEUR au bas au-dessus de la base.	HAUTEUR au-dessous de la base.	HAUTEUR de la base.
		En bas.	En haut.	En bas.	En haut.			
		m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.
1 seul bouilleur.	1	0,24	0,20	0,22	0,18	0,33	8	2,50
	2	0,41	0,25	0,38	0,22	0,33	10	3,00
	3	0,56	0,28	0,53	0,25	0,33	12	3,20
	4	0,60	0,30	0,67	0,27	0,33	14	3,40
	6	0,65	0,35	0,60	0,30	0,44	16	3,60
	8	0,74	0,40	0,77	0,35	0,44	18	3,80
	10	0,82	0,42	0,70	0,38	0,55	20	3,90
	12	0,88	0,44	1,04	0,40	0,55	22	4,00
2 bouilleurs.	15	1,04	0,48	1,035	0,425	0,55	24	4,20
	20	1,16	0,54	1,10	0,48	0,55	25	4,30
	25	1,22	0,60	1,15	0,53	0,55	25	4,30
	30	1,46	0,66	1,38	0,58	0,55	28	4,60
	35	1,40	0,70	1,32	0,62	0,66	30	4,80
	40	1,45	0,75	1,37	0,67	0,66	30	4,80
	45	1,50	0,80	1,42	0,72	0,66	30	5,00
	50	1,67	0,85	1,57	0,75	0,66	32	5,00
	60	1,62	0,90	1,52	0,80	0,77	34	5,20
	70	1,80	0,96	1,69	0,85	0,77	36	5,40
	80	1,88	1,04	1,76	0,92	0,77	36	5,40
	90	1,84	1,10	1,72	0,98	0,88	38	5,60
	100	2,01	1,15	1,88	1,02	0,88	40	5,80
	120	2,11	1,25	1,96	1,10	0,88	40	5,80
	150	2,16	1,40	1,98	1,22	0,99	42	6,00
	180	2,38	1,50	2,23	1,35	0,99	44	6,20
	200	2,60	1,60	2,40	1,40	0,99	46	6,40
	250	3,04	1,80	2,82	1,58	0,99	50	6,60
	300	3,32	2,00	3,07	1,75	1,10	55	7,00

548. *Tableau des épaisseurs et des hauteurs des différentes zones verticales composant les cheminées. La 1re zone forme le sommet de la cheminée et a 0m,11 d'épaisseur; au-dessus est la 2e zone, qui a 0m,22 d'épaisseur; puis la 3e qui a 0m,33, et ainsi de suite.*

HAUTEUR totale de la cheminée.	1re 0m,11	2e 0m,22	3e 0m,33	4e 0m,44	5e 0m,55	6e 0m,66	7e 0m,77	8e 0m,88	9e 0m,99	10e 1m,10
m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.
8	1,50	2,65	3,85							
10	1,80	3,30	4,90							
12	2,00	4,00	6,00							
14	2,50	4,50	7,00							
15	2,50	3,50	4,50	4,50						
16	2,50	3,50	4,50	5,50						
18	3,00	4,00	5,00	6,00						
20	2,80	3,40	4,00	4,60	5,20					
22	3,00	3,70	4,40	5,10	5,80					
24	3,20	4,00	4.80	5,60	6,40					
25	3,30	4,15	5,00	5,85	6,70					
28	3,60	4,60	5,60	6,60	7,60					
30	3,00	3,80	4,60	5,40	6,20	7,00				
32	3,30	4,10	4,90	5,70	6,50	7,50				
34	3,00	3,60	4,20	4,80	5,40	6,00	7,00			
35	3,00	3,50	4,50	5,00	5.50	6,00	7,50			
36	3,00	3,70	4,40	5,10	5,80	6,60	7,40			
38	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00	5,50	6,00	6,50		
40	3,00	3,55	4,10	4,65	5,20	5,80	6,50	7,20		
42	3,00	3,40	3,80	4,20	4,60	5,00	5.50	6,00	6,50	
44	3,00	3,45	3,90	4,35	4,80	5,30	5,80	6,40	7,00	
46	3,00	3,50	4,00	4,50	5.00	5,60	6.20	6,80	7,40	
50	3,20	3,70	4,20	4,80	5,40	6,00	6,70	7,50	8,50	
55	3,20	3,70	4,20	4,70	5,20	5,70	6,20	6,70	7,40	8,00

Dans ces deux tableaux, les épaisseurs sont données en multiples de la largeur 0m,11 d'une brique; mais il faut tenir compte de l'épaisseur des joints qui est de 0m,005 environ; ainsi la 3e zone, qui est formée d'une brique et demie, a 0m,34 d'épaisseur; la 4e a 0m,46; la 5e, 0m,575; la 6e, 0m,69, etc.

549. Stabilité des cheminées d'usines. D'une note de M. Krafft (*Annales des ponts et chaussées*, 1873) nous extrayons ce qui suit :

Les *Annales* (novembre 1872) contiennent un travail de M. l'ingénieur Renaud sur la chute d'une cheminée de filature, au Havre. De ce travail, il résulte :

1° Que l'on peut négliger la résistance due aux mortiers, et, par une sorte de compensation, ne pas se préoccuper de l'influence des oscillations;

2° Que l'on doit compter avec les vents, qui donnent, d'après les observations de Fresnel (1831), une pression de 150 kilog. par mètre carré sur la méridienne d'une cheminée pyramidale. Sur certains points, cette pression peut même s'élever à 170 kilog (Observations de M. Nordling, *Annales des ponts et chaussées*, 1864, 1868 et 1870.)

Supposant, ce qui est suffisamment approché, que le vide intérieur

de la cheminée soit constitué par un seul tronc de cône ou de pyramide ayant pour bases la section inférieure et la section au sommet, et appelant :

A le côté ou le diamètre extérieur du fût à la base;
a le côté ou le diamètre extérieur du fût au sommet;
A' et a' les dimensions homologues intérieures;
H la hauteur;
p le poids du mètre cube de maçonnerie,

pour une cheminée carrée, le poids des maçonneries est (*Int.* 860, 878) :

$$\frac{1}{3} H[A^2 + a^2 + Aa - (A'^2 + a'^2 + A'a')]p,$$

et l'intensité totale du vent (*Int.* 687) :

$$\frac{A+a}{a} H \times 150.$$

Le bras de levier de la résistance est $\frac{A}{2}$, abstraction faite de l'influence des oscillations; celui de la puissance est égal à la distance de la base au centre de gravité de la section méridienne du fût, c'est-à-dire à (*Int.* 1596) :

$$H \frac{A + 2a}{3(A+a)}.$$

Le coefficient de stabilité ou le rapport du moment de la résistance à celui de la puissance est donc :

$$S = \frac{[A^2 + a^2 + Aa - (A'^2 + a'^2 + A'a')]Ap}{150H(A + 2a)}.$$

Pour une cheminée ronde, en tenant compte du coefficient 3/2, on a :

$$S = \frac{3\pi[A^2 + a^2 + Aa - (A'^2 + a'^2 + A'a')]Ap}{8 \times 150H(A + 2a)}.$$

En prenant $p = 1600$ kilog., on trouve :
pour une cheminée carrée :

$$S = 10{,}677 \frac{[A^2 + a^2 + Aa - (A'^2 + a'^2 + A'a')]A}{H(A + 2a)};$$

pour une cheminée ronde :

$$S = 12{,}566 \frac{[A^2 + a^2 + Aa - (A'^2 + a'^2 + A'a')]A}{H(A + 2a)}.$$

Ainsi, à dimensions égales, une cheminée ronde présente une stabilité supérieure de 1/5 environ à celle d'une cheminée carrée.

Le produit de S par 150 représente l'intensité du vent capable de renverser la cheminée.

Ces calculs faits pour un certain nombre de cheminées conduisent aux observations suivantes, qui cesseraient d'être complètement vraies avec une autre valeur de p :

1° Les constructeurs se guident en général d'après le sentiment plutôt que d'après des règles précises, car les coefficients de stabilité varient de 1,00 à 3,22, c'est-à-dire du simple au triple.

2° La règle empirique que l'on suit souvent et qui consiste, étant donnée la section au sommet, à adopter un fruit extérieur de 25 à 30 millimètres par mètre, n'a pas une importance absolue. Ce fruit doit plutôt être regardé comme dérivant d'une inspiration architecturale, et il est à remarquer que M. Nordling donne également à ses piles métalliques des fruits de 25 à 35 millimètres.

3° De ce qu'il existe des cheminées construites avec le coefficient 1 et qui résistent, il résulte que le sentiment de certains constructeurs les a conduits à adopter des dimensions qui correspondent précisément au minimum possible. Cette confirmation du chiffre de 150 kilog. a sa valeur.

4° Il est imprudent de descendre au-dessous du coefficient 1,00, même avec de bonnes maçonneries. Aucune construction connue n'autoriserait cette hardiesse.

Citons à l'appui de cette opinion deux cheminées : L'une, située à Bischwiller (Alsace), avait été construite avec des dimensions donnant le coefficient 0,74. Elle est tombée sous l'action d'un vent de tempête, en mars 1868, cinq mois après son achèvement. L'intensité du vent était vraisemblablement de 124 kilog. par mètre carré. La seconde, située à Haguenau (Alsace), aurait pu tenir sans un affaissement des fondations qui a fait prendre à l'axe une inclinaison de 1° 0′ 46″ sur la verticale; elle n'avait plus alors qu'un coefficient de 0,82 et s'est écroulée sous l'effort d'un vent violent, en novembre 1869.

550. Tirage produit par un ventilateur (354). Péclet rapporte que dans un des bains établis sur la Seine, à Paris, la fumée, après avoir circulé autour de la chaudière à eau chaude, se répartit dans douze tubes d'un petit diamètre et de 20 mètres de longueur, ayant ensemble une section égale à $0^{mq},10$, et plongés dans le réservoir d'eau froide qui alimente la chaudière. Par cette circulation, la fumée se refroidit à peu près complètement, et à son entrée dans la cheminée, elle a sensiblement la température de l'eau du réservoir. A l'extrémité des conduits, se trouve un ventilateur qui aspire la fumée et la jette dans la cheminée. Le tambour du ventilateur a $0^{m},80$ de diamètre et $0^{m},40$ de largeur; le tuyau d'écoulement a $0^{m},20$ de diamètre. Ce ventilateur, mû par un seul homme, fait 40 tours par minute, et suffit à l'appel de la fumée provenant de 0,44 stère de bois pelard, pesant 171 kilog., brûlé en deux heures; ce qui fait par heure 85 kilog., qui équivalent à peu près, du moins pour la quantité d'air nécessaire à la combustion, à 42 kilog. de houille. Supposant que le tirage à l'air chaud absorbe le quart de la chaleur totale développée par le combustible, un homme, dans les circonstances

défavorables que nous venons de citer, a donc produit l'effet de $\frac{42}{4} = 10^k,5$ de houille, qui correspondent à la force de 2,5 chevaux-vapeur ou de 17 hommes.

Dans une brasserie de Louvain, un ventilateur absorbant le travail de 6 chevaux suffit en une heure à la combustion de 1 000 kilog. de houille, dont le 1/4, c'est-à-dire 250 kilog., serait absorbé par le tirage à l'air chaud; dans ce cas, 6 chevaux en remplacent donc de 50 à 60.

Pour un cheval-vapeur, on brûle en 10 heures à peu près 40 kilog. de houille, qui coûtent 2 fr. à Paris; un *homme-vapeur* pendant 10 heures coûte donc $\frac{2}{7} = 0^f,30$; comme il faut 2 hommes vivants pour un travail journalier de 10 heures, ce travail coûterait donc 4 fr. environ à Paris, c'est-à-dire autant que celui de 2 chevaux-vapeur, ou que 14 fois celui d'un *homme-vapeur*. Cela suppose toutefois qu'on néglige l'entretien de la machine, l'intérêt des frais d'établissement et d'amortissement de ces frais; du reste ces causes de dépense sont peu de chose quand la force est prise sur une machine qui commande déjà d'autres appareils.

551. Tirage produit par un jet de vapeur. D'après des expériences de M. Glépin, un jet de vapeur à 5 atmosphères lancé par un ajutage de $0^m,03$ de diamètre intérieur dans l'axe d'un tuyau de $0^m,50$ de diamètre et de 3 mètres de longueur, a produit par seconde l'écoulement de $3^{mc},285$ d'air à la température de 17° et sous la pression de $0^m,7615$, et l'excès de pression intérieure a été de $0^m,0575$ d'eau ou $47^m,31$ d'air. Il en résulte que le travail produit a été de $3,285 \times 1,214 \times 47,31 = 188^{km}$; ce qui correspond à 2,5 chevaux-vapeur. Comme la vapeur dépensée correspond à 36 chevaux, le rapport de l'effet utile à l'effet dépensé est donc de 0,069.

Ayant fait varier le diamètre de l'ajutage, ainsi que le diamètre et la hauteur du tuyau, mais la pression du jet de vapeur étant toujours de 5 atmosphères, M. Glépin a obtenu les résultats du premier tableau, p. 738.

Pour les dépressions maximum de ce tableau, qui correspondent évidemment au plus grand effet utile, on déduit, en opérant comme ci-avant, les rapports de l'effet utile à l'effet dépensé consignés au second tableau, p. 738.

D'après ces tableaux, on voit que l'effet utile produit par un jet continu de vapeur est très faible. Cet effet utile est beaucoup plus grand quand le jet est intermittent, comme dans les locomotives; ce qui est probablement dû à ce qu'alors la vapeur agit à peu près à la manière d'un piston.

TUYAUX D'INJECTION.		DIFFÉRENCES DE PRESSION EN HAUTEUR D'EAU, pour les diamètres intérieurs d'ajutage :		
Diamètres.	Hauteurs.	0m,01.	0m,02.	0m,03.
m.	m.	m.	m.	m.
0,20	1,00	0,00325	0,0070	0,00975
	2,00	0,0045	0,00825	0,0130
	2,50	0,0040	0,0095	0,0150
0,30	1,00	0,0050	0,0120	0,0205
	2,00	0,0075	0,0180	0,0290
	2,50	0,0085	0,0200	0,0340
0,40	0,84	0,0035	0,0070	0,0110
	1,68	0,0080	0,0210	0,0370
	2,50	0,0090	0,0270	0,0500
0,45	0,83	0,0030	0,0090	0,0095
	2,00	0,0085	0,0255	0,0430
	2,50	0,00975	0,0300	0,0560
	3,00	0,0090	0,0280	0,0515
0,50	0,84	0,0035	0,0060	0,00875
	2,00	0,0090	0,02575	0,0490
	2,50	0,0105	0,0280	0,0530
	3,00	0,010	0,0310	0.0600
	3,50	0,010	0,0320	0,0580
0,55	2,00	0,0085	0,0240	0,0380
	2,50	0,0085	0,0280	0,0520
	3,00	0,0095	0,0310	0,0600
	3,50	0,0085	0,0320	0,0580

TUYAUX D'INJECTION.		RAPPORTS DE L'EFFET UTILE A L'EFFET DÉPENSÉ, pour les diamètres d'ajutage :		
Diamètres.	Hauteurs.	0m,01.	0m,02.	0m,03.
m.	m.			
0,20	2,00	0,0131	»	»
	2,50	»	0,0191	0,0086
0,30	2,50	0,0345	0,0562	0,0292
0,40	2.50	0,0361	0,0917	0,0520
0,45	2,50	0,0405	0,1030	0,0620
0,50	2,50	0,0425	»	»
	3,00	»	»	0,0690
	3,50	»	0,1145	»
0,55	3,00	0,0393	»	0,0690
	3,50	»	0,1145	»

D'après Flachat et Petiet, le travail produit par le jet intermittent de vapeur dans les cheminées des locomotives varie de 1/2 à 1/6 du travail que la vapeur pourrait produire. Le diamètre de la cheminée d'une locomotive étant de 0m,32 à 0m,35, et le volume de gaz écoulé par seconde variant de 3mc,72 à 8mc,00, la vitesse d'écoulement est de 45 à 83 mètres par seconde, au lieu de 2 à 3 mètres qu'elle pourrait être par le simple tirage de la cheminée (544).

MÉTALLURGIE. FONDERIES

552. Métaux ferreux et alliages usuels (1). **Classification** (438). Les métaux ferreux sont des composés de fer et de carbone; ils constituent une série continue, c'est-à-dire qu'il est impossible d'établir entre eux des limites précises. En pratique, on appellera, d'après Gruner :

1° *Fonte*, le produit fondu brut de la réduction des minerais de fer. C'est un fer impur, qui n'est pas malléable, mais qui peut se tremper par refroidissement brusque (562).

2° *Fer doux*, le métal plus ou moins épuré, extrait de la fonte ou directement des minerais de fer, malléable à chaud et à froid, mais non susceptible de prendre la trempe.

3° *Acier*, tout produit intermédiaire, pouvant supporter la trempe, mais restant malléable à chaud et à froid s'il n'est pas trempé (564).

4° *Fer aciéreux* et *fonte aciéreuse*, produits assez mal définis qui viennent s'intercaler entre les précédents.

Il s'est établi une confusion par rapport aux dénominations métallurgiques; on comprendra facilement d'où elle vient, en se rappelant que le fer contient 0,002 à 0,0005 de carbone; l'acier, 1 à 1,5; la fonte, 2 à 5 p. 100. Pour la plupart des praticiens, le fer ne se trempe pas et se soude à lui-même à chaud; certaines fontes sont élastiques, tandis que d'autres sont susceptibles de durcir par la trempe. L'acier se soude à chaud comme le fer, il se trempe par refroidissement brusque, après avoir été porté au rouge, c'est-à-dire qu'il acquiert, par la trempe, des propriétés d'élasticité ou de dureté, et il perd ces mêmes propriétés après avoir été chauffé, puis refroidi lentement. Pour tout le monde la fonte ne se forge pas.

On comprend, d'ailleurs, que les procédés métallurgiques fournissent des produits intermédiaires dans lesquels la proportion de carbone ne se rapporte pas aux chiffres précédents. Aussi, en 1876, la commission métallurgique de l'Exposition de Philadelphie a-t-elle eu l'idée de trancher la question en divisant les produits métallurgiques en quatre classes :

1° *Fer soudé* (*weld iron*, *Schweisseisen*), comprenant tout composé ferreux malléable formé des éléments ordinaires de ce métal, et obtenu soit par la réunion de masses pâteuses, soit par paquetage ou par tout autre procédé n'impliquant pas la fusion, et qui, d'ailleurs, ne durcit pas à la trempe; bref, tout ce que l'on a désigné jusqu'à ce jour par le nom de *fer doux* (*wrought iron*).

2° *Acier soudé* (*weld steel*, *Schweisstahl*), composé analogue qui, pour

(1) Pour la rédaction de ce chapitre, nous avons puisé notamment dans l'ouvrage de M. Debauve : *Procédés et matériaux de construction*, dans les rapports du *Congrès des procédés de construction*, tenu à Paris en 1889, et dans les études faites sur la métallurgie dans la *Semaine des Constructeurs*, par M. L.-A. Barré, en 1889, et par M. Marcel Daly, en 1891.

une cause quelconque, durcit par l'action de la trempe et fait partie de ce qu'on appelle aujourd'hui acier naturel, acier de forge, ou plus particulièrement acier puddlé.

3° *Fer fondu* (*ingot iron*, *Flusseisen*), tout composé ferreux malléable comprenant les éléments ordinaires de ce métal qui aura été obtenu et coulé à l'état fondu, mais qui ne durcit pas sensiblement par la trempe.

4° *Acier fondu* (*ingot steel*, *Flusstahl*, tout composé pareil qui, par une cause quelconque, durcit par la trempe.

Cette classification repose exclusivement sur le mode de production du métal et sur ses qualités de trempe; elle n'est pas passée dans la pratique. Pour définir un acier, on tient compte, avant tout, aujourd'hui, de sa limite d'élasticité, de sa résistance et de son allongement à la rupture, en un mot, de ses propriétés mécaniques (576). Comme exemple, voici le classement adopté à la Compagnie des chemins de fer P.-L.-M., par le service du contrôle du matériel fixe :

DÉSIGNATION		ACTION de la trempe.	TEXTURE.	LIMITE D'ÉLASTICITÉ minima.	RÉSISTANCE A LA RUPTURE en kilogrammes par millimètre carré	ALLONGEMENT POUR 100, à la rupture mesuré sur 100 millimètr. dans le sens longitudinal.
				kil.	kilog.	pour 100
Aciers	Extra-durs.	Trempe énergique.	Grain fin.	»	80 à 100	6 à 8
	Très durs. .	*Idem*	*Idem*.	»	78 à 80	8 à 12
	Durs. . . .	*Idem*	*Idem*.	35	60 à 70	12 à 18
	Doux. . . .	Trempe ferme. . .	Grain bien formé.	33	50 à 60	18 à 22
	Très doux.	Trempe faible. . .	*Idem*.	30	45 à 50	22 à 24
Fer fondu.	Soudable. .	Ne trempe pas . .	Texture soyeuse.	27	40 à 45	24 à 28
	Soudant. . .	*Idem*	*Idem*.	29	35 à 40	28 à 32

Afin de compléter ce tableau, nous le rapprocherons des résultats moyens suivants que donne le fer puddlé couramment employé dans les constructions métalliques.

Fer misé.	Ne trempe pas . .	Texture à nerf. .	18	32 à 34	8 à 10
Fer pour rivets (qualité chaudière) . . .	*Idem*	Texture à grains	35	35	15

Malgré ces essais de classification, il existe encore une confusion parmi les praticiens. Ainsi les uns appellent *aciers* des produits qui n'ont pas la propriété de tremper; tandis que d'autres conservent pour certains produits le nom de *fontes trempées*.

L'acier fondu est nécessairement obtenu par voie de fusion, mais il a la propriété de se laisser forger.

Au point de vue de la nomenclature, il reste un progrès à accomplir.

Des tentatives ont été faites pour classer les aciers suivant leur résistance (1); mais on n'est pas encore arrivé à un accord parfait.

553. Densité des fers, fontes et aciers. La densité du fer varie selon le travail auquel il a été soumis, et le moyen par lequel on l'a obtenu. Voici quelques chiffres à ce sujet :

Fer du commerce (moyenne)	7,70	
Fer (densité minima)	7,35	
Fer laminé en tôle mince	7,60	(d'après Berzelius).
Fer de Suède étiré en fils	7,75	
Fer de Suède forgé en barres	7,84	
Fer de Danemora (Suède), en barres martelées	7,91	(d'après Thomson).
Fer déposé par la pile électrique	8,14	(d'après Percy).
Acier (densité moyenne	7,40 à 7,90	
Acier Bessemer ou Martin	8 à 8,10	
Fontes blanches cristallines	7,50	
Fontes noires graphiteuses	7,10	
Fonte (densité minimum)	6,60	
Fonte (densité maximum)	7,90	

554. Température de fusion. La fonte fond à la température de 1050 à 1300 degrés, le fer malléable de 1500 à 1600°, les aciers de 1400 à 1600° et même 2000°; à une très haute température, on peut même volatiliser l'acier.

555. Minerais de fer. Le *fer* est obtenu directement de certains minerais riches :

1° En les chauffant au contact du charbon de bois (*méthode catalane*) 5 ou 6 heures suffisent pour une opération; cette méthode très ancienne et rudimentaire ne donne que 33 de fer pour 100 de minerai (2);

2° On l'obtient en grande quantité au moyen du *haut fourneau* (556), dans lequel le minerai et la houille sont placés ensemble. Le résultat de la fusion du minerai est connu sous le nom de *fonte*, combinaison de fer et de carbone; cette fonte affinée, c'est-à-dire épurée et débarrassée de son carbone, par des opérations complémentaires, donne des produits de plus en plus purs et finalement se transforme en *fer doux* et ductile.

Les minerais de fer qu'on exploite le plus sont :

Le *peroxyde de fer*, anhydre (Fe^2O^3) ou hydraté ($2Fe^2O^3, 3H^2O$) [hématites rouges et brunes (60 p. 100 de fer), fer oligiste (64,40 p. 100 de fer), spéculaire, micacé; fer olithique, limonite, rouille, etc.].

L'*oxyde magnétique* (Fe^2O^3, FeO), qui contient 72,41 p. 100 de fer.

Les *carbonates de fer* (fer spathique (48,2 p. 100 de fer), fer carbonaté amorphe, etc.).

Les minerais *schisto-bitumineux* (40 à 60 p. 100 de fer) et *silicatés* (35 à 40 p. 100).

Les minerais de fer *sulfurés*, *phosphorés* et *arséniés*, dont on ne tirait jadis que de mauvais fers, peuvent être utilisés en partie, aujourd'hui, grâce aux progrès de la fabrication.

(1) Pour la classification d'après la résistance, voir n° 576.

(2) M. Siemens a imaginé une méthode de fabrication du fer qui n'est autre que celle des forges catalanes exécutée avec les appareils modernes. On réduit le minerai par le charbon, sans passer par l'intermédiaire de la fonte.

La *franklinite* contient 45,16 de fer, 20,30 de zinc et 9,38 de manganèse p. 100.

La plupart du temps, le minerai de fer est enveloppé d'une *gangue*, c'est-à-dire de matières étrangères inertes (quartz, silice, chaux, argile, etc.), qu'il faut éliminer dans le traitement.

Les minerais contenant moins de 25 p. 100 de fer ne sont plus traités aujourd'hui.

556. Hauts fourneaux (voir page 401, à la fin du CHAUFFAGE, et n° 587 pour l'utilisation de leurs gaz). Un haut fourneau se compose de deux troncs de cône réunis par leurs bases; le cône supérieur ou *cuve* est en briques réfractaires. Il se termine à la partie supérieure par une ouverture ou *gueulard*, par laquelle se fait le chargement. Des ouvertures latérales donnent issue aux gaz combustibles qui sont recueillis dans un gros tube métallique latéral. Le cône inférieur (ou *les étalages*) est en pierres siliceuses infusibles. Au-dessous se trouve un cylindre en pierres réfractaires, appelé *l'ouvrage*, dans la partie inférieure duquel viennent déboucher les trois tuyères d'une forte machine soufflante. Au-dessous de l'ouvrage se trouve le *creuset*, qui se termine antérieurement par une paroi nommée *dame*, devant laquelle existe un plan incliné. Le creuset est percé inférieurement d'un *trou de coulée* ou *trou de chio*, qui pendant l'opération est bouché par un tampon d'argile.

Après avoir introduit dans le haut fourneau le combustible suffisant, on y ajoute des charges alternatives de *minerai*, de *castine* (calcaire) et de *charbon*, dans le rapport de 300 de minerai pour 80 de castine et 110 de charbon. On met ensuite le feu et l'on fait jouer la machine soufflante. Au bout de 12 à 24 heures, le creuset est rempli; on enlève le tampon d'argile et la fonte coule, puis se solidifie dans des canaux demi-cylindriques; elle est à l'état de *gueuses*.

La hauteur d'un haut fourneau est d'autant plus grande que le combustible et le minerai sont plus denses. On adopte généralement les hauteurs suivantes :

Avec du charbon de bois léger	6 à 8	mètres.
— du charbon de bois mêlés.	8 à 10	—
— du charbon de bois dur et coke.	10 à 15	—
— du coke léger.	13 à 17	—
— du coke dur	31^{m},50	—
— de l'anthracite	21^{m},50	—

Pour produire une tonne de fonte grise, un haut fourneau, avec un minerai dont la teneur est de 30 à 40 p. 100, doit avoir une capacité de 6 à 7 mètres cubes avec du coke et de 4 à 6 mètres cubes avec du charbon de bois. Avec un minerai riche en fer de 40 p. 100, pour produire 50 tonnes de fonte en 24 heures, il faut une capacité du haut fourneau de 250 à 350 mètres cubes.

Le diamètre du *ventre* est compris entre 1/3 et 1/5 de la hauteur totale. Le diamètre maximum est de 8 mètres en Angleterre, et de 5^{m},50 seu-

lement en France. La hauteur du ventre au-dessus du sol est de 1/2 à 1/3 de la hauteur du haut fourneau.

L'*ouvrage*, lorsqu'on emploie du coke, doit avoir 1 mètre à 1^m,50 de hauteur avec du minerai dont la teneur en fer est de plus de 40 p. 100, pour la fonte grise, et de 0^m,75 à 1^m,25 pour la fonte blanche (562). Si le minerai est inférieur, la hauteur de l'ouvrage est de 1^m,25 à 2 mètres pour la fonte grise et de 1^m,30 à 1^m,50 pour la fonte blanche. Si le combustible est le bois pour les deux sortes de fontes, on donne à l'ouvrage de 1 mètre à 1^m,50 de hauteur. Le diamètre de l'ouvrage se détermine en admettant que, pour deux hauts fourneaux analogues de dimensions et traitant les mêmes minerais, les quantités de fonte produites soient proportionnelles à la section de l'ouvrage. Généralement, ces diamètres sont compris entre 0^m,50 (pour une production de 3 à 6 tonnes de fonte en 24 heures) et 2^m,70 (pour une production de 80 tonnes), le minerai contenant de 40 à 50 p. 100 de fer.

Le *gueulard* doit avoir un diamètre égal aux 4/5 ou 5/10 de celui du ventre. La pression des gaz au gueulard est de 4 à 10 centimètres d'eau.

Le *creuset* est cylindrique; son diamètre est celui de l'ouvrage aux tuyères; sa hauteur varie entre 0^m,50 et 1 mètre. La largeur de l'avant-creuset est les 2/3 du diamètre du creuset.

Pour produire une tonne de *fonte grise*, il faut 1000 kilog. de coke avec des minerais riches, 1300 kilog. avec des minerais à 45 p. 100, et 1800 kilog. avec des minerais inférieurs.

Pour la fonte blanche, la consommation de coke est inférieure de 150 à 200 kilog. à la quantité nécessaire pour produire la fonte grise, les minerais étant les mêmes.

On peut faire de 3 à 4 coulées par 24 heures. Les hauts fourneaux au bois durent environ une année, sans avoir besoin de réparations; ceux au coke peuvent durer 3, 6 et même 15 années.

557. Cubilots (588). Les cubilots, employés pour traiter la fonte, sont des fourneaux cylindriques, dont la hauteur, depuis les buses des tuyères jusqu'au gueulard est de 2^m,50 à 3^m,50 quand on emploie le coke, et de 4^m,70 à 6 mètres quand on emploie le charbon de bois. Pour chaque kilog. de fonte produite par heure, on prend 1^{m2} à 1^{m2},25 de section. Le diamètre du cubilot ne doit jamais être inférieur à 0^m,50. L'épaisseur des parois du cubilot varie de 0^m,15 à 0^m,30.

La quantité de fonte obtenue varie avec la quantité de combustible brûlé dans l'unité de temps, laquelle varie à son tour avec la quantité de vent injecté. La fonte grise est la plus employée; on la charge avec du coke et du calcaire (3 à 4 p. 100 de la fonte à obtenir).

La section totale des ouvertures qui amènent le vent doit être au moins 1/8 de la section de la cuve du cubilot. L'air arrive à une pression variant entre 180 et 300 millimètres d'eau.

La partie inférieure du cubilot est recouverte d'une couche de terre réfractaire et de sable pilonné de 160 à 200 millimètres d'épaisseur. La hauteur des buses de tuyères au-dessous du fond du cubilot varie de

650 millimètres (avec le coke) à 300 millimètres (avec le charbon de bois).

Pour 100 kilog. de fonte introduite au cubilot, il faut consommer 10 à 20 kilog. de coke ou 30 à 60 kilog. de charbon de bois.

Un cubilot de 0m,50 à 0m,60 de diamètre, d'une contenance de 1 500 à 3 000 kilog. et d'une charge au gueulard de 100 à 200 kilog., produit de 600 à 1 200 kilog.

Pour un cubilot de 1m,50 à 2m,50 de diamètre, contenant 25 000 à 35 000 kilog., les charges de fonte étant de 400 à 500 kilog., la production varie entre 5 000 et 7 500 kilog.

558. Fours à réverbère. Ils servent surtout à fondre en grosses pièces : la *fonte*, au moyen de *houille*, ou le *bronze*, au moyen de *bois*. La durée de la fusion d'une charge varie de 5 à 6 heures. La houille consommée est de 50 à 90 kilog. par 100 kilog. de fonte brute introduite. Pour fondre ces 100 kilog. de fonte, la surface de grille doit être $0^{m^2},21$, la section de passage $0^{m^2},127$. La longueur de la sole est de 3 à 4 mètres; elle est formée de sable quartzeux pilonné et inclinée de 1° à 2° vers le trou de coulée. L'épaisseur de la voûte varie de 0m,12 à 0m,15.

559. Fours à creusets. Ils sont employés pour fondre de petites quantités de métal. Ces fours empêchent le contact entre le métal à fondre et le combustible. Ils sont en argile ou en graphite, et ne contiennent guère plus de 30 kilog. de métal.

Pour 100 kilog. de fonte, on dépense 200 kilog. de coke avec un seul creuset. S'il y en a plusieurs, cette consommation de coke descend à 80 kilog. 100 kilog. d'acier fondu exigent 200 à 400 kilog. de coke.

560. Four rotatif de Samuel Danks, pour le puddlage de la fonte (voir t. II, année 1872, *Annales des mines*, note de M. Amiot, et une note publiée, en février 1873, dans les *Annales des ponts et chaussées*, par M. Lemoine). Le procédé Danks consiste dans l'emploi d'un four dont le laboratoire est un cylindre horizontal en fonte, pouvant recevoir un mouvement de rotation autour de son axe, et revêtu intérieurement d'un enduit d'oxyde de fer. La rotation du cylindre produit le brassage de la fonte, et les parois fournissent l'oxygène nécessaire à l'oxydation du carbone. L'ouvrier est ainsi dispensé de la manœuvre pénible du crochet, et il n'a plus à souffrir de la chaleur du four. En même temps, le rendement est augmenté par la réduction partielle de l'oxyde de fer des parois, et la qualité est améliorée par une élimination plus complète du soufre et du phosphore.

561. Four rotatif Pernot (mémoire de M. Henry, *Annales des mines*, t. VI, 1874). L'adoption du four Danks entraîne la modification complète de l'usine; il faut non seulement changer les fours, mais encore augmenter de beaucoup la puissance des appareils cingleurs et des laminoirs; on ne peut, en effet, cingler et laminer avec les outils existants les boules énormes de fer brut que l'on retire du four Danks. On a cherché une disposition qui rendît le travail du puddlage, sinon complètement mécanique, du moins beaucoup plus facile pour l'ouvrier, et qui n'entraînât pas avec elle un changement radical dans l'outillage de

la forge. M. Pernot, chef de la fabrication à l'usine de Saint-Chamond (Loire), a adopté, en 1873, un four à sole circulaire, en forme de cuvette, tournant autour d'un axe faisant un petit angle avec la verticale.

562. Fontes. Les fontes contiennent 95 à 98 p. 100 de fer et 5 à 2 de carbone. Souvent elles renferment du soufre, du phosphore, du silicium, du manganèse, du chrome, de l'arsenic, etc. On classe les fontes en deux groupes : *fonte blanche* et *fonte grise*, suivant l'état sous lequel le carbone est associé au fer.

Dans la *fonte blanche*, le carbone est intimement lié au fer, de manière à former une masse homogène. La couleur de cette fonte est argentine et sa cassure est brillante. Sa densité varie de 7,4 à 7,8. Elle est dure et cassante ; elle se brise par le choc et ne se laisse pas entamer par la lime. On s'en sert seulement pour fabriquer des surfaces très dures. Elle est employée spécialement pour obtenir le fer et l'acier. Elle fond entre 1 050 à 1 100°.

La *fonte grise* n'est pas un produit homogène : une partie du carbone y est combinée au fer dans la proportion de 2 à 2,5 p. 100, et le reste du carbone est disséminé dans la masse sous forme de paillettes graphiteuses. Sa couleur varie du gris noir au gris clair. Elle est plus malléable que la fonte blanche et se laisse travailler au tour et à la lime. Sa densité varie de 6,8 à 7. Elle fond à 1 200° et elle entre instantanément en fusion. Elle devient très fluide et est très propre au moulage. On s'en sert pour mouler des colonnes, des piliers, des cylindres de machines à vapeur, etc.

La production directe de la fonte, à l'état de fonte blanche ou de fonte grise, dépend tout à la fois de la température à laquelle se fait l'opération dans le haut fourneau et aussi de la nature des minerais. Si la température est élevée, on obtient de la fonte grise; si la température est moins forte, on obtient de la fonte blanche. Les minerais qui contiennent une forte proportion de manganèse sont propres à la fabrication de la fonte blanche, tandis que le silicium favorise la formation de la fonte grise. La fonte blanche se transforme en fonte grise en se refroidissant lentement. Une partie du carbone se sépare et cristallise en paillettes dans la masse.

Entre la fonte blanche et la fonte grise, il y a des produits intermédiaires connus sous le nom de *fontes truitées* qui sont utilisés pour moulage.

563. Affinage de la fonte. L'affinage de la fonte, qui a pour objet d'éliminer le carbone et d'autres substances telles que le phosphore, le silicium, le soufre, etc., s'obtient par deux procédés différents :

Le *procédé comtois* consiste à chauffer la fonte au contact du charbon de bois dans un foyer ouvert. Par tonne de fer, il faut 1 680 kilog. de fonte, 200 kilog. de rognures ou chutes, et 52 hectolitres de charbon de bois.

Dans la *méthode anglaise*, le combustible est la houille et l'on fait usage d'un four fermé dit *four à réverbère* ou *four à puddler* (558 et 590).

Par tonne de fer, il faut 1 880 kilog. de fonte d'affinage et 900 kilog. de houille.

Dans les deux méthodes, la matière obtenue est corroyée sous de puissants marteaux, et après des corroyages successifs, qui ont pour objet d'expulser les matières étrangères, on obtient du fer qui ne contient plus que de 0,002 à 0,005 de carbone et 0,0005 de silicium et quelquefois un peu d'arsenic et de soufre. Le fer obtenu fond à 1 500°. Sa densité est de 7,8. Il devient fibreux par le martelage. Cette texture fibreuse est très recherchée, mais elle se modifie par les vibrations ainsi que le montrent les câbles des ponts suspendus et les essieux de wagons. La cassure devient alors cristalline et le fer a perdu de sa résistance.

564. Acier. L'*acier* est une combinaison de fer et de carbone. La proportion du carbone y est moins grande que dans la fonte. Les aciers de bonne qualité en contiennent de 1 à 1,5 p. 100. La limite minimum est de 0,7 de carbone p. 100. Suivant le degré de trempe (571), l'acier devient dur et même cassant comme dans les limes, ou élastique comme dans les ressorts.

C'est à la proportion déterminée du carbone dans les aciers, variable dans des limites très resserrées, qu'il faut attribuer les propriétés d'élasticité ou de résistance qu'ils acquièrent par la trempe. En effet, si la proportion de carbone devient supérieure au chiffre de 1,5, le produit se rapproche de la fonte et ne se soude pas. Un produit ferreux qui contient seulement 0,25 de carbone p. 100 n'a pas la propriété de durcir par la trempe. A la dose de 0,6 de carbone p. 100, le fer devient aciéreux ; il commence à durcir par la trempe.

565. Influence de quelques corps alliés au fer. Le fer qui contient une très petite quantité de soufre ou d'arsenic est cassant. Le phosphore rend aussi le fer cassant jusqu'à la proportion de 0,5 p. 100 (1/200). Au-dessous de cette proportion, le fer peut présenter une bonne qualité pour confectionner des objets qui exigent de la dureté à l'usure, notamment pour les rails.

Le manganèse augmente la ténacité des aciers et atténue la propriété brisante du phosphore. Le chrome augmente la résistance des aciers. Le silicium est recherché dans les fontes Bessemer, parce qu'en se combinant avec l'oxygène il y a élévation de température, ce qui facilite l'opération. Le manganèse produit un effet analogue (572).

566. Procédés pour fabriquer l'acier. Depuis longtemps l'acier s'obtient par deux procédés inverses l'un de l'autre :

1° La *carburation du fer* se pratique surtout par *cémentation*, c'est-à-dire en mettant du fer et du charbon (*cément*) en contact, en vase clos, à une température élevée (ce procédé date de 1630). Industriellement on dispose dans un four *ad hoc* des barres de fer de petites dimensions, par lits successifs, au milieu de poussière de charbon renfermant des matières organiques azotées. On chauffe 12 ou 15 jours au rouge vif. L'acier ainsi obtenu, recouvert de boursouflures, s'appelle également *acier poule*. Lorsqu'on soumet cet acier à la fusion, on

obtient un *acier fondu*, métal plus homogène que le précédent, obtenu, dès 1740, par B. Hunstman, à Sheffield (Angleterre).

2° La *décarburation partielle de la fonte* s'obtient par affinage direct sans fusion ou par affinage de la fonte fluide. L'affinage direct sans fusion consiste à oxyder lentement le carbone de la fonte par voie de grillage ou à l'aide d'agents oxydants solides. Un affinage partiel donne la *fonte malléable aciéreuse*. L'affinage de la fonte fluide se fait soit au bas foyer, ce qui donne l'*acier de forge* ou *acier naturel*, soit au four à réverbère, ce qui donne l'*acier puddlé* (procédé Karsten, 1838), soit enfin par les procédés dits *pneumatiques* (Bessemer, etc.), ou à *réaction* (Siemens-Martin, etc.).

Les aciers naturels, puddlés ou de cémentation, ne sont pas homogènes; ce sont les anciens aciers que l'on améliore en les fondant au blanc soudant et en leur faisant subir des corroyages successifs sous le marteau.

On désigne sous le nom d'*acier fondu* un acier obtenu en fondant dans un creuset de l'acier de cémentation. Cette fusion a pour objet de rendre l'acier homogène. Cet acier fondu est ensuite martelé et étiré en barres. L'acier simplement puddlé est relativement commun. Il sert à confectionner des outils aratoires.

Le puddlage de l'acier se fait comme celui du fer. Mais, au lieu d'une décarburation complète de la fonte, on arrête l'opération au moment où la teneur en carbone est jugée suffisante. On décarbure la fonte au contact de scories riches et de battitures de fer.

567. Acier Bessemer. Le *procédé pneumatique* ou *Bessemer*, qui date de 1855, consiste à faire passer au milieu de la fonte en fusion, contenue dans une cornue appelée *convertisseur*, une multitude de jets d'air comprimé, qui produisent à la fois l'oxydation, le chauffage et le brassage de la masse.

La cornue se compose d'un corps en forte tôle ou en fonte de 4 mètres de hauteur environ sur $2^{m},50$ de diamètre au ventre et $0^{m},015$ d'épaisseur, suspendue par deux tourillons. Elle est ainsi mobile autour d'un axe horizontal. L'un des tourillons, qui est creux, donne accès à l'air sous pression qui, de là, par un conduit spécial, se rend dans la *boîte à vent* placée à la base de la cornue. Celle-ci est revêtue à l'intérieur de briques réfractaires siliceuses (procédé acide), ou d'un pisé manganésien (procédé basique). Elle peut contenir 7 à 8 tonnes de métal et parfois plus.

Le haut de la cornue se rétrécit en forme de bec de coulée. On dispose les cornues par paire, au bord d'une fosse demi-circulaire où se trouvent réunies les *lingotières*. L'acier se coule, soit en *source*, c'est-à-dire dans toutes les lingotières à la fois, soit séparément, dans chacune d'elles, par l'intermédiaire d'une *poche*, ou chaudron monté sur plaque tournante à pivot. On peut faire avec le convertisseur de 12 à 24 opérations en 24 heures. En Amérique, on en fait jusqu'à 40.

Avec le *procédé acide*, la marche du travail est la suivante : chauffer la cornue au rouge, y couler la fonte liquide, donner le vent pendant

15 à 20 minutes (1); ajouter le *spiegel-eisen* (2) ou fonte riche en manganèse; couler. Durée totale : 17 à 25 minutes.

Au point de vue chimique, il y a trois périodes : 1° oxydation de la fonte et des matières étrangères (silicium, etc.) et formation de scories; 2° décarburation de la fonte avec dégagement d'oxyde de carbone; 3° récarburation.

Le *procédé basique* ou de *déphosphoration* a surtout pour but d'éliminer le phosphore des fontes. Pour cela, on fait entrer le phosphore en combinaison avec une base et on l'expulse parmi les scories. L'appareil est toujours le même; seulement, le revêtement intérieur, au lieu d'être siliceux, est magnésien (pisé de chaux magnésienne agglomérée au goudron). La marche de l'opération est analogue à la précédente; mais on ajoute à la fonte, avant son introduction dans la cornue, 15 à 20 p. 100 de chaux et 1 à 2 p. 100 de fluorure de calcium; on réajoute ensuite un peu de chaux (5 à 6 p. 100) après la période de décarburation du métal qui ne dure ici que de 9 à 10 minutes, et l'on donne alors de nouveau 4 à 5 minutes de vent avant de verser le spiegel-eisen. C'est pendant cette dernière période, dite de *sursoufflage*, que le phosphore s'élimine.

Les déchets du procédé Bessemer sont variables : 9 à 12 p. 100 avec de la fonte de 1re fusion; 12 à 15 p. 100 avec de la fonte de 2e fusion. On charge de 3800 à 4500 kilog. de fonte dans le convertisseur, et on ajoute 8 à 10 p. 100 de spiegel-eisen, à la fin. Pour 1000 kilog. de fonte, on obtient 850 kilog. de lingots, 50 kilog. de riblons et 100 kilog. de déchets.

568. Acier Martin-Siemens. Le *procédé Martin*, qui date de 1865, consiste à affiner la fonte sur la sole d'un four à gaz, à réverbère, en la fondant avec le fer malléable. Les fontes traitées par ce procédé sont, en général, moins siliceuses que celles que l'on traite au Bessemer. On se sert de fours fixes du système *Siemens* (fours à récupérateurs, de chaleur), ou du four rotatif *Pernot* (561).

On distingue plusieurs variantes dans le procédé Martin, soit que l'on fasse dissoudre le fer en barres dans le bain de fonte, soit qu'on remplace une partie du fer par du minerai riche ou par des loupes de fer brut. Mais, dans les trois cas, on outrepasse l'affinage proprement dit, comme pour le Bessemer, et l'on récarbure le métal, après coup, par l'addition du ferro-manganèse.

Pour un bain de fonte initial de 1590 kilog., on ajoute successivement dans le procédé Martin Siemens : 1940 kilog. de fer, 1805 kilog. d'acier,

(1) La quantité de vent injectée varie de 20 à 30 mètres cubes par minute et par tonne de fonte, à la pression de 115 centimètres de mercure. Cette pression doit être environ le double de la hauteur de fonte sur le fond.

(2) Le manganèse produit dans le convertisseur une réaction plus ou moins violente se manifestant par une flamme plus ou moins abondante à la gueule et par un bouillonnement très marqué. Le manganèse, à cause de son oxydabilité, ne peut être introduit libre. Le *spiegel-eisen* est une fonte cristalline qui en contient 10 pour 100 environ. Cette fonte refondue sert de véhicule au manganèse et introduit aussi le carbone nécessaire à l'aciération du métal affiné de la cornue.

et, finalement, 486 kilog. de spiegel-eisen à 15 p. 100 de manganèse. On obtient ainsi un lingot de 5721 kilog., 93 kilog. de riblons et 218 kilog. de rebuts.

La sole du four a environ $3^m,30$ de long et $0^m,50$ d'épaisseur; elle est formée d'un mélange de parties égales de sable de mer et de sable d'eau douce. La coulée se fait à très peu près comme pour les appareils Bessemer. Les lingots bruts sont réchauffés dans un four au gaz, puis laminés en barres et livrés au commerce.

On peut prolonger l'opération de telle manière qu'on puisse essayer les aciers obtenus. Le procédé Bessemer est rapide. Au contraire, la méthode Martin-Siemens est lente (de 8 à 10 heures). Cette lenteur est une cause de succès, parce qu'elle permet de suivre la transformation du métal et de la corriger par des additions successives de matières.

En 1878, M. Jordan, professeur à l'École centrale, disait que le four à réverbère chauffé au gaz était un appareil complaisant qui permet de faire une véritable cuisine métallurgique, et il donnait comme exemple que, pour obtenir un métal très doux qui ne trempe pas, il suffit de forcer la proportion de fer en additions successives et d'ajouter, à la fin de l'opération, une certaine dose de manganèse métallique, aussi pur que possible. Pour obtenir un métal doux, se moulant sans soufflures, le manganèse ne suffit plus et il est nécessaire d'ajouter du silicium pour décomposer les gaz carbonés et éviter ainsi les soufflures.

Spectroscope. La fin des opérations Bessemer s'annonce, selon les fontes, par la chute de la flamme plus ou moins accentuée. Cela se passe surtout ainsi quand on traite des fontes de 2e fusion; car alors on a très peu de métaux étrangers à brûler. Mais en 1re fusion, les choses ne se passent pas ainsi, surtout lorsqu'on traite des fontes très manganésées. Généralement les opérations sont fumeuses, le carbone et le manganèse se trouvant en quantité plus notable. Il est alors quelquefois difficile d'apprécier la fin. On se sert alors du spectroscope.

Lorsque, avec cet instrument, on regarde la flamme qui sort de la gueule du convertisseur, on aperçoit dans le vert du spectre un groupe de raies qui ont été reconnues comme accusant la combustion du carbone. Elles disparaissent complètement à la fin des opérations, et il ne reste plus que la raie jaune très accentuée, qui est considérée comme étant la raie du sodium. Alors l'opération Bessemer est achevée; on doit généralement arrêter là l'affinage, renverser le convertisseur, ajouter le spiegel et couler l'acier.

569. La métallurgie actuelle. On emploie maintenant le haut fourneau pour fabriquer une série d'alliages nouveaux, à des teneurs variables, tels que les ferro-manganèse, ferro-chrome, ferro-silicium (572), ces alliages étant de précieux auxiliaires dans la préparation des aciers. D'autres progrès sont dus au réchauffage de l'air lancé par la soufflerie avant son introduction dans le haut fourneau et aussi à l'augmentation de pression de cet air. Les souffleries fournissent maintenant de l'air à la température de plus de 700°.

M. Alfred Hallopeau, professeur à l'École centrale, a rapproché (en

1889) les chiffres suivants concernant les productions métallurgiques. En 1789, le haut fourneau fournissait seulement 1500 kilog. de fonte au bois par 24 heures. Actuellement, il en donne, dans le même temps, jusqu'à 150000 kilog. en marchant au coke, c'est-à-dire 100 fois autant, tout en produisant des fontes de première qualité.

La production des fers et des aciers présente aussi des progrès remarquables au point de vue des quantités obtenues. Autrefois, le *feu catalan* par affinage direct du minerai ou bien encore le *feu comtois* par affinage de la fonte produisait en plusieurs heures 100 kilog. de fer martelé, après un travail des plus pénibles et avec une consommation énorme de charbon; aujourd'hui, l'affinage de la fonte se fait dans la cornue Bessemer et donne, en une demi-heure, jusqu'à 12 tonnes d'acier plus ou moins dur, et le four Martin-Siemens produit en 12 heures jusqu'à 15 tonnes d'acier doux ou de fer fondu.

L'un des perfectionnements signalés par M. Jordan, à l'Institut, en 1889, consiste dans le procédé de M. *G. Robert*, administrateur des forges de Stenay, pour affiner la fonte, en appliquant au convertisseur Bessemer le soufflage sur un seul côté, au moyen de plusieurs tuyères placées horizontalement. Ces tuyères effleurent presque la partie supérieure du bain de fonte. Le vent agit seulement sur la couche superficielle du bain, en lui imprimant un mouvement gyratoire qui amène successivement toutes les parties en contact avec le courant d'air. Dans ces conditions, le métal, obtenu sans aucun brassage, est sain, sans soufflures, très malléable, très homogène et d'une résistance considérable. On obtient ainsi des aciers moulés soudables et des fers fondus soudants.

570. Forgeage et laminage de l'acier. Une fois l'acier obtenu à l'état de masse solide : boules sortant du four à puddler, lingots du Bessemer, etc., on le réchauffe, et on le corroie pour lui donner, enfin, la forme sous laquelle il devra être employé dans l'industrie : fers de toute nature, tôles, rails, etc. L'acier brut, en effet, est toujours plus ou moins poreux. Au microscope, on voit des groupes de grains cristallisés séparés les uns des autres par des espaces considérables. Le corroyage, qu'il se fasse au *marteau-pilon* ou au *laminoir* fait disparaître ces vides et donne à la pièce un *grain* plus régulier.

Depuis quelques années on est parvenu, en *coulant l'acier sous pression*, à obtenir directement des pièces en acier, sans passer par le forgeage ou le laminage; on se contente alors simplement de recuire et de tremper le métal.

571. Trempe de l'acier. Tremper l'acier, c'est le refroidir brusquement après l'avoir porté à une haute température. On obtient ce résultat en plongeant le métal chauffé dans un bain d'eau, d'huile, de mercure, etc., et même parfois dans un courant d'air. L'acier refroidi lentement est ductile ou malléable comme le fer; la trempe le rend dur et élastique, mais lui communique toujours un peu d'aigreur qu'on enlève ensuite par un *recuit* convenable.

Les effets de la trempe et du recuit varient suivant le degré de car-

buration du métal, les températures auxquelles l'acier est porté dans l'une et l'autre opération, enfin suivant la nature du bain. Ainsi, la trempe à l'eau durcit les surfaces, rend le métal élastique, mais aussi plus fragile. La limite d'élasticité s'élève; la résistance à la rupture diminue. La trempe à l'huile, au contraire, si elle durcit moins la surface, augmente les deux limites d'élasticité et de résistance à la rupture. On fait donc varier le mode de trempe suivant la nature d'acier qu'on cherche à obtenir (578).

572. Modifications de l'acier, du fer, etc., par les corps étrangers (565). Nous avons vu que l'acier est un composé de fer et de carbone, carburé moins que la fonte et plus que le fer doux. L'acier le plus riche en carbone en contient 1,9 p. 100, en poids. Dans les aciers extra-doux ou fers soudés cette proportion tombe à 0,15 et même au-dessous.

Les corps étrangers que l'on rencontre dans l'acier sont : le silicium, le phosphore, le soufre, l'azote, l'arsenic et le manganèse. Industriellement on y introduit aussi le chrome (573), le tungstène (573), le nickel (qui augmente sa résistance), etc. Ces corps, en l'absence du carbone, ne forment pas avec le fer de véritables aciers; mais leur présence modifie les propriétés physiques du métal (577).

Le soufre et le phosphore rendent le fer cassant, ainsi que l'acier. Le manganèse, par suite de son affinité pour le carbone, le retient dans l'acier et élimine en les réduisant les oxydes de fer dissous dans la masse en fusion. Le manganèse augmente la ténacité des aciers. Le silicium, le soufre, le phosphore, expulsent et remplacent le carbone.

Le phosphore donne aux aciers une aigreur qui s'oppose au laminage et au martelage. Le carbone et le phosphore ne peuvent exister simultanément dans le fer sans le rendre cassant. Les fontes phosphoreuses peuvent donner du fer d'assez bonne qualité, mais ces fontes sont tout à fait impropres à la fabrication de l'acier, par la raison que pour ne laisser dans le fer que 0,005 de phosphore, il faut éliminer presque tout le carbone. Il en résulte que le principe aciérant, qui est le carbone, fait défaut.

On a constaté que 1 p. 100 de phosphore rend la fonte fusible, mais en même temps très cassante; 1/2 p. 100 rend le fer plus malléable à chaud, plus facilement soudable à la forge; mais, en même temps, le nerf ou la texture fibreuse est supprimé et est remplacé par un grain sans résistance. Dans l'acier, 0,001 de phosphore rend le laminage impossible, s'oppose à la trempe et donne un métal excessivement cassant.

Les minerais phosphoreux sont les plus abondants dans la nature. Leur richesse en fer est de 30 p. 100 environ; ils contiennent 1/2 p. 100 de phosphore. Les fontes qui sont dérivées de ces minerais contiennent de 0,2 à 2 p. 100 de phosphore. Dans les diverses opérations que subissent les minerais, tout le phosphore du minerai et du combustible se concentre dans la fonte. C'est seulement depuis une douzaine d'années que l'on transforme directement les fontes phosphoreuses en acier. En 1878 MM. Sydney Thomas et Percy Gilchrist, chimistes aux aciéries Martin, à

Blenavon, imaginèrent une méthode de déphosphoration. En 1879, des coulées de 6000 kilog. établirent la réussite de la méthode.

Des essais du même genre furent faits en Autriche, en Belgique, en Allemagne, en France (au Creusot.) La déphosphoration des fontes s'est répandue plus vite à l'étranger qu'en France, bien qu'aucune région n'était plus intéressée comme celle du Nord-Est français à la mise en valeur des minerais phosphoreux qu'elle contient. Aujourd'hui l'Angleterre tire un grand parti de la déphosphoration dans les usines de Bolckow, Waughan et Sheffield.

573. Acier au tungstène. Acier chromé. Le tungstène augmente la dureté de l'acier jusqu'à la proportion de 3 p. 100; au delà de cette proportion l'acier devient cassant. Depuis 1879, l'usage de l'acier chromé s'est répandu en France; mais on en fabriquait en Amérique dès 1869. Le chrome augmente la résistance de l'acier au choc et au ployage. Quand la teneur en carbone est assez grande, l'acier chromé est dur et ne se laisse pas percer par le foret. L'alliage du chrome et de l'acier élève la température de fusion du métal qui devient alors difficile à couler. On fabrique des tôles laminées en acier chromé qui présentent une très grande résistance au choc des balles.

Pour l'influence des corps étrangers sur la résistance des métaux ferreux voir n° 577.

574. Résistance de la fonte (voy. p. 412, 415 et 443). Elle résiste beaucoup moins à la traction qu'à la compression. Elle est fragile au choc. Les meilleures fontes anglaises ont une *charge de rupture à la traction* qui varie de 11 à 20 kilog. par millimètre carré, avec un *allongement* de 0,5 à 1 p. 100 et une *charge limite d'élasticité* de 4 à 8 kilog.

A Terre-Noire, on fabrique des fontes dont la résistance à la rupture varie, suivant la classe, de $6^k,5$ à $17^k,5$ par millimètre carré.

Les *charges de rupture à la compression* s'élèvent, au contraire, à 75 ou 85 kilog. par millimètre carré, et le *raccourcissement* sous la charge de rupture est de 8 à 10 p. 100 (1).

Pour les travaux dépendant du ministère des travaux publics, en France, on admet comme charge de sécurité R :

à la traction : $R = 1$ kilog. par millimètre carré,
à la compression : $R = 5$ kilog. par millimètre carré.

On admet des valeurs plus élevées dans la pratique courante (respectivement 2, 5 et 7). Pour la résistance des pièces de fonte chargées debout, consulter les expériences de Hodgkinson (369 et 441).

575. Résistance du fer (voy. p. 412, 415, 421 et 444). On rencontre, dans la pratique, différentes sortes de fer, auxquels on a conservé de vieilles dénominations :

Le *fer doux* est le pus plur. Il est du reste malléable et se rouille vite. Le *fer fort dur* ou *fer aciéreux* est le fer du commerce employé pour les

(1) On appelle *striction* la contraction ou diminution de *section* transversale qu'éprouve la barre de métal en expérience. Elle devient surtout visible un peu avant la rupture. On mesure la section de striction après la rupture.

pièces de grande résistance. Il est plus dur et moins élastique que le précédent.

Le *fer fort-mou* est moins résistant et moins ductile que les deux précédents. Le *fer demi-fort* est le fer intermédiaire.

On dit qu'un fer est à *grain* si sa texture est cristalline, il est à *nerf* si elle est fibreuse. Le premier est plus dur et moins résistant que le second. C'est le corroyage, le martelage et l'écrouissage qui rendent le fer nerveux.

Le fer *rouverin* ou *métis* est celui qui contient du soufre ou de l'arsenic. Il casse à chaud. Cassure terne et foncée; s'il est fibreux, les fibres sont non adhérentes. Le *fer aigre* est celui qui est cassant à froid. Ce défaut lui vient de la présence du phosphore.

On appelle *fer cendreux* celui qui présente de petites taches grises à sa surface, qui se manifestent au polissage (corroyage ou martelage insuffisant, indique la présence de scories ou de fer oxydé non expulsé de la masse).

Le fer est dit *pailleux* ou contenant des pailles, lorsque ces impuretés prennent une certaine importance. Les pailles, en constituant des points faibles, rendent le métal fragile.

Enfin on emploie les désignations de : *fer fondu*, pour marquer celui que l'on obtient par fusion, au Bessemer par exemple (567). On le range souvent sous le nom d'*acier doux* ou *extra-doux*. *Fer soudé*, celui qui est obtenu sans fusion complète, par paquetage, etc., comme le fer puddlé. *Fer forgé*, celui qui a subi un corroyage, laminage ou martelage, etc.

La résistance du fer varie dans de sensibles proportions, suivant les indications suivantes :

	Charge de rupture.	Allongement p. 100.		Charge de rupture.	Allongement p. 100.
Fer ordinaire.	33	12	Fer fin au bois	38	25
Fer fort.	35	18	Fers du Yorkshire n° 7.	41	42
Fer fort supérieur. . .	37	23	— n° 1.	47	23

Le bon fer forgé courant se rompt sous la traction de 35 à 38 kilog.

Les règlements administratifs français indiquent 6 kilog. comme charge de sécurité à la traction aussi bien qu'à la compression pour les travaux définitifs en fer. On porte ce chiffre à 7 et même 8 dans la pratique, et à 10 pour les constructions provisoires.

576. Résistance des aciers (voir p. 412, 415 et 422). Les aciers se classent, suivant leur résistance, en aciers très doux, doux, durs, très durs et extra-durs (p. 740). En pratique, il ne faut s'adresser, pour les constructions métalliques, qu'aux aciers doux ou très doux, de 45 à 48 kil. de résistance. Les autres ont une limite d élasticité trop faible. On adopte pour charge de sécurité, R, à la traction et à la compression :

$$R = 8 \text{ à } 10 \text{ kilog., parfois même } 15.$$

Voici un tableau des essais pratiqués sur les aciers aux forges de Tamaris (Gard) :

NUMÉROS des aciers.	DEGRÉS de trempe.	L LIMITE d'élasticité.	R CHARGE de rupture par millim.	A ALLONGEMENT sur 100 millim.	S CONTRACTION.	$\frac{L}{R}$
		kil.	kil.	p. 100	p.100	
1. Extra-doux. .	Ne trempe pas . .	26	35 à 40	28 à 32	65	0,74 à 0,65
2. Très doux . .	Ne trempe pas . .	29	41 à 45	25 à 28	59	0,71 à 0,64
3. Doux.	Trempe faible. . .	31	46 à 50	22 à 25	55	0,67 à 0,62
4. Mi-doux . . .	Trempe sensible. .	35	51 à 55	20 à 22	50	0,69 à 0,63
5. Mi-dur. . . .	Trempe assez bien.	39	56 à 60	18 à 20	47	0,70 à 0,65
6. Dur	Trempe bien . . .	41	61 à 65	15 à 18	45	0,67 à 0,63
7. Très dur. . .	Trempe à l'huile .	43	66 à 70	12 à 15	43	0,67 à 0,58
8. Extra-dur . .	Trempe à l'huile.	45	71 à 75	10 à 12	35	0,63 à 0,60
9. Extra-dur . .	Trempe à l'huile. .	49	76 à 80	8 à 10	30	0,64 à 0,61
10. Extra-dur . .	Trempe forte . . .	52	Au-dessus de 80	Moins de 8	29	» »

Il est intéressant de rapprocher ces résultats de ceux que nous avons donnés (p. 740). (Classement des aciers P.-L.-M.)

577. Influence de la composition chimique sur la résistance (565, 572):

1° *Carbone.* Le métal fondu atteint par la trempe une résistance à la rupture d'autant plus grande que la proportion de carbone est plus forte. Voici quelques résultats d'essais comparatifs (barreaux trempés à l'huile) :

Teneur en carbone pour 100.	0,15	0,49	0,709	0,875
Charge limite d'élasticité par millimètre carré . . .	32	44	68	90
Charge de rupture.	46	70	107	106
Allongements proportionnels pour 100.	28	12	1	1

Plus la teneur en carbone est élevée, plus le métal devient fragile sous le choc.

2° *Manganèse.* De même que pour le carbone, la présence du manganèse semble augmenter la résistance du métal, au-dessous d'une certaine proportion. Voici quelques chiffres d'expériences :

La teneur en manganèse ayant varié de	0,521 à 2,008 pour 100.
La charge limite d'élasticité a varié de . . .	26 à 47 kilog.
Et la charge de rupture de	51 à 88 kilog.

(Barreaux à l'état naturel non trempés).

Le manganèse possède, en outre, la propriété de neutraliser plus ou moins l'effet pernicieux du phosphore (572).

3° *Phosphore.* Le phosphore augmente la résistance à la rupture du métal et accroît aussi, dans une grande proportion, sa fragilité au choc. L'action du phosphore varie, cependant, avec la teneur en carbone. Les aciers les plus doux sont ceux qui paraissent supporter le mieux la présence de ce métalloïde. (A Terre-Noire, en réduisant le carbone à 0,10 p.100, on a pu forcer jusqu'à 0,40 p.100 la proportion de phosphore).

4° Une trop grande proportion de *silicium* empêche la trempe; le fer *azoté* est cassant et même friable; une petite quantité de *soufre* ou d'*arsenic* suffit à rendre l'acier dur et cassant.

578. Influence de la trempe sur la résistance (571) :

1° *Le fer doux* est insensible à la trempe à l'eau pure ou à l'huile. La trempe à l'eau acidulée augmente sa résistance à la rupture et tend à transformer le fer à grain en fer à nerf (p. 753).

2° *Acier puddlé et fer aciéreux.* La trempe augmente leur résistance à la rupture; c'est ainsi qu'un essai fait sur des barreaux en acier puddlé a donné 42 kilog. par millimètre carré, comme charge de rupture, à l'état naturel, et 48 kilog. après la trempe. Mais l'élasticité du métal diminue, au contraire.

3° *Acier fondu.* On trempe l'acier fondu à l'huile, après l'avoir porté au rouge cerise. Voici les résultats obtenus au Creusot dans ces conditions :

ACIER FONDU. Effets de la trempe et du recuit.	BARREAUX naturels.	BARREAUX trempés à l'huile.	BARREAUX recuits après la trempe.
	kil.	kil.	kil.
Charge de rupture par millimètre carré. . . .	55	70	65
Allongement pour 100 de longueur.	18	13	16
Charge limite d'élasticité.	26	38	33

579. Influence de la température sur la résistance de l'acier et du fer. Le degré de résistance du métal s'abaisse au fur et à mesure que la température augmente. Voici quelques chiffres. (La température est indiquée en degrés centigrades, et nous avons adopté le chiffre 100 pour représenter la résistance des métaux à 0°; en sorte que le chiffre marqué dans les deux colonnes « fer fibreux » et « acier Bessemer » indique, en centièmes de la résistance initiale, la résistance du métal à une température donnée.)

Température.	Fer fibreux.	Acier Bessemer.	Température.	Fer fibreux.	Acier Bessemer.
Degrés cent.	Résistances.	Résistances.	Degrés cent.	Résistances.	Résistances.
0	100	100	700	16	18
100	100	100	900	6	9
300	90	94	1000	4	7
500	34	38			

On constate que la loi de décroissance est, à peu de chose près, la même pour le fer et l'acier. Ce dernier présente cependant un faible avantage. On constate aussi que les variations peuvent être considérées comme nulles entre 0 et 100°. C'est dire que, dans des conditions normales, on n'a pas à craindre une diminution de résistance statique (1) dans les pièces métalliques d'une construction, puisque les plus grands

(1) La résistance statique est celle que le métal oppose aux efforts continus ou lentement variables. On peut appeler, par opposition, résistance dynamique celle qu'il oppose aux chocs ou aux efforts répétés.

écarts de température, dans nos climats tout au moins, sont loin d'atteindre un chiffre pareil.

Au contraire, lorsque l'élévation de température dépasse 100° centigr., la résistance du métal diminue d'une façon notable. A 300°, elle a déjà perdu le dixième de sa valeur. A 500°, elle est réduite au tiers environ. Elle devient presque nulle à 1000°. Or, la température d'un foyer d'incendie, quoique très variable, atteint aisément des températures intermédiaires entre 500 et 1000°. On sait combien les constructions en fer ou en acier ont à redouter le feu quand les pièces qui les composent ne sont pas revêtues d'enveloppes protectrices.

Le froid diminue la résistance *au choc* des pièces en fer et de l'acier en particulier. Le phénomène est d'autant plus marqué que la proportion de phosphore est plus élevée.

580. Le corroyage et le martelage d'un acier, après une série de *chaudes* successives, augmentent sa résistance à la rupture; mais si l'opération est répétée trop souvent, cette résistance, après avoir atteint un maximum, diminue. Ainsi, un acier puddlé a passé, après quatre corroyages à chaud successifs, de 68 kilog. (comme valeur de résistance à la rupture, par millimètre carré de section) à 82 kilog. Au bout du 7e corroyage, cette valeur était retombée à 64 kilog.

Le martelage à froid augmente la résistance à la rupture, mais diminue l'élasticité.

581. Cisaillage et poinçonnage. Souvent, les pièces de charpente métallique sont poinçonnées avant d'être mises définitivement en place. Cette opération a pour but de percer mécaniquement des trous pour le passage des rivets ou des boulons; on agit par compression, pour séparer une rondelle de métal de la pièce elle-même. L'opération désagrège le métal dans le voisinage immédiat du trou et diminue sensiblement sa résistance. Ceci n'arrive pas lorsqu'on perce le métal au foret.

La diminution de résistance due au poinçonnage a été mise en lumière au Congrès des procédés de construction de 1889.

« Si nous considérons, dit M. Considère, ingénieur des ponts et chaussées, une barre de $0^m,060$ de largeur, percée d'un trou *poinçonné* de $0^m,0205$ de diamètre et une autre barre, de même dimension, percée d'un trou *foré* de $0^m,0271$, la résistance est la même dans les deux cas; il en résulte que $0^m,0395$ de métal, se trouvant à côté d'un trou poinçonné, ont la même résistance que $0^m,0329$ de ce métal se trouvant à côté d'un trou foré. La différence de largeur est de $0^m,066$. Si je divise cette différence par 39,5, je trouve une perte de résistance de 17 p. 100 pour le métal poinçonné... »

Une barre ou tôle percée, suivant l'usage ordinaire, en un nombre quelconque de lignes parallèles, peut être considérée comme formée d'une série de bandes parallèles, les unes intactes, les autres percées, suivant leurs axes, d'une seule ligne de trous; dans le calcul de la section de la pièce, on devra donc tenir compte de la réduction de résistance imposée aux barres percées. Les mêmes considérations s'appli-

quent indifféremment au fer ou à l'acier. De même que le poinçonnage, le *cisaillage* diminue la résistance de la pièce dans le voisinage immédiat de la section.

582. Résistance de l'acier à l'écrasement. L'élasticité et la charge limite d'élasticité sont sensiblement les mêmes (pour le fer et l'acier) à la traction et à la compression. Mais la charge de rupture est plus élevée à la compression qu'à la traction pour l'acier. Voici le tableau, d'après M. Debauve, pour le fer et l'acier :

RÉSISTANCES COMPARATIVES DU FER ET DE L'ACIER à l'écrasement.		CHARGE limite d'élasticité (en kilog. par millim. carré).	CHARGE de rupture à l'écrasement (en kilog. par millim. carré).
		kil.	kil.
Fer. .	A grains fins	6	100
	A nerfs	14	80
Acier. .	Bessemer brut en lingots, n° 3.	15	165
	Id. *id.* *id.* n° 7.	9	91
	Id. forgé ou laminé, n° 3.	34	190
	Id. *id.* *id.* n° 7.	15	101
	Siemens-Martin. . . . . . n° 2	37	211
	Id. *id.* . . . . . . n° 7.	24	102

583. Usages de l'acier. Nous représentons la résistance à la rupture par la lettre R, l'allongement p. 100 par A, et la proportion de carbone p. 100 par C.

Voici un tableau qui donne une idée générale des divers usages des aciers suivant leur composition. La classification est celle de la société Cockerill, de Seraing (Belgique).

L'acier très dur ($C = 0,65$ et plus, $R = 69$ à 105, $A = 5$ à 10) sert à faire les ressorts fins, les broches de filature, etc.

L'acier dur ($C = 0,55$ à $0,65$) s'emploie pour les ressorts ordinaires, les limes, scies, etc.

L'acier demi-tendre ($C = 0,45$ à $0,55$, $R = 56$ à 60, $A = 10$ à 20) pour les rails, les glissières, etc.

L'acier tendre ($C = 0,35$ à $0,45$) pour les pièces de machines, les bandages, rails, etc.

L'acier extra-tendre ($C = 0,25$ à $0,35$, $R = 48$ à 56, $A = 20$ à 25) pour les tôles et les armes (canons, fusils, etc.).

C'est dans cette dernière catégorie et dans celle qui vient immédiatement au-dessous (*fers fondus* ou *aciers très doux*, n° 2, du tableau des forges de Tamaris et fers misés dits de construction, p. 754), que l'on choisit le plus souvent le métal pour les charpentes. Plus l'acier auquel on s'adresse est dur, plus il est résistant à la rupture, mais moins il est malléable; les difficultés de travail, les prix de revient augmentent alors, en même temps qu'il devient possible de diminuer les sections

des pièces employées. L'usage de tel ou tel acier est ainsi affaire de calcul et d'appréciation pour chaque cas.

Les fers misés employés dans les constructions métalliques ordinaires ont une résistance à la rupture (sens du laminage) de 32 kilog. pour un allongement de 6 p. 100 sur une longueur de 100 millimètres, et l'on adopte, dans le calcul, 7 kilog. seulement comme *charge pratique*, c'est-à-dire comme charge maxima à faire supporter au métal mis en œuvre, aux points où il travaille le plus.

Les fers fondus soudables ou aciers très doux, que l'on produit déjà à des prix presque égaux à ceux du fer misé, sont caractérisés par une aussi grande malléabilité et par les coefficients de 40 à 44 kilog. à la rupture, pour 25 p. 100 d'allongement. Leur emploi, qui tend à se généraliser, constitue donc un progrès évident, puisqu'en réduisant la charge de rupture dans la même proportion que pour le fer misé, on obtient une charge pratique notablement supérieure : $\frac{7}{32} \times 40$ ou $\frac{7}{32} \times 44$, soit une valeur comprise entre 8,5 et 10, ce qui permet de réduire notablement les poids employés.

Il est clair que, pour des constructions de dimensions exceptionnelles, on pourra être conduit à se servir d'un métal encore plus résistant, malgré la diminution de malléabilité que cette condition entraîne.

Coefficients adoptés pour quelques ouvrages récents :

R *Résistance à la rupture par millimètre carré ;*
Al *Allongement proportionnel ;*
C E *Charge limite d'élasticité.*

Pont du Forth (Écosse). Dimensions de la plus grande travée : 518 mètres.

	R.	Al.
Barres comprimées	57 kilog.	17 p. 100.
Barres courantes	47	20
Rivets	41	25

Palais des machines, à l'Exposition de 1889. (Conditions stipulées par le cahier des charges, lors de la première adjudication qui ne prévoyait que l'emploi de l'acier). Portée des fermes : 115 mètres.

	R.	Al.	C. E.
Aciers courants	42 à 46 kilog.	20 p. 100	24 kilog.
Rivets	34 à 42	28	»

Pont du Rio de Malecco (Chili). Cinq travées de 69^{m},50 chacune, en poutres à treillis à larges mailles.

	R.	Al.
Tôles courantes	45 kilog.	25 p. 100.
Rivets	35	12 à 14

On voit que les aciers employés se rapprochent tous des aciers doux du commerce.

584. Tôles d'acier. En 1866, on ne connaissait pas la tôle d'acier. Mais aujourd'hui elle est employée dans la fabrication des chaudières à vapeur. Dans la marine, on en fait aussi un grand usage, depuis 1872, bien que les premiers essais remontent à 1859. Un des grands et principaux avantages des navires en acier, c'est qu'ils pèsent sensible-

ment moins que les navires en fer. La diminution de poids, qui est de 20 p. 100, est due à la plus grande résistance de l'acier par rapport au fer.

En outre des usages que nous avons indiqués, l'emploi de l'acier s'est étendu et tend chaque jour à s'étendre davantage à la construction des ponts pour chemins de fer. (Voir PONTS MÉTALLIQUES, vol. II.)

Depuis plusieurs années aussi des usines ont construit des solives à double T en acier. Il y a même lieu de croire que dans un avenir prochain les poutrelles à double T pour planchers seront aussi en acier, par ce double fait que l'acier présente une résistance double de celle du fer, ce qui permettra d'augmenter la portée des ouvrages, et que, d'autre part, son prix diminue d'année en année.

Pour les RAILS, voir au 2ᵉ volume : CHEMINS DE FER.

585. Statistique *Production de la fonte en France, en* 1890 :

	Fonte d'affinage.	Fonte de moulage. ou moulée en 1ʳᵉ fusion.	Totaux.
Fonte au coke	1 476 203 tonnes	455 607 tonnes.	1 931 810 tonnes.
— au bois	11 779	1 941	13 720
— mixte	2 178	22 452	24 630
Totaux	1 490 160	480 000	1 970 160

Dans cette industrie, le département de Meurthe-et-Moselle tient la tête avec 1 083 705 tonnes, c'est-à-dire avec une production dépassant celle de tous les autres départements réunis. Le département qui occupe le deuxième rang (Nord) fournit seulement 235 584 tonnes; celui qui se trouve en troisième (Pas-de-Calais), 86 710 tonnes.

Production du fer en France, en 1890.

Au point de vue du mode de fabrication, la production du fer se résume ainsi :

Puddlé	678 147 tonnes.
Affiné au charbon de bois	12 353
Obtenu par réchauffage de vieux fers et riblons.	132 860
Ensemble	823 360

Par rapport à la nature des produits, ces mêmes totaux se décomposent de la façon suivante :

Rails	141 tonnes.
Fers marchands et spéciaux	696 583
Tôles	126 636
Total égal	823 360

Les départements qui contribuent pour la plus large part à la fabrication de ces quantités de métal sont : le Nord, la Haute-Marne, les Ardennes, Saône-et-Loire, Meurthe-et-Moselle, la Loire, la Seine, l'Allier, etc.

Production de l'acier en France, en 1890.

Acier	Fondu au foyer Bessemer	337 102 tonnes.
	Fondu au four Siemens-Martin	191 590
	Puddlé et de forge	17 327
	Cémenté	1 288
	Fondu au creuset	13 734
	Obtenu par réchauffage de vieil acier	5 156
	Ensemble	566 197

Les chiffres ci-dessous expriment le nombre de tonnes obtenues sous chaque forme principale :

Rails	173930 tonnes.
Aciers marchands	284484
Tôles	107783
Total égal	566197

En 1890, sur le nombre de tonnes de rails d'acier fabriquées, 171195 ont été obtenues dans les foyers Bessemer, et 2735 seulement dans les fours à réverbère. Le Pas-de-Calais, le Nord, Meurthe-et-Moselle, les Landes, le Gard, Saône-et-Loire, sont les départements qui donnent des rails.

Les principaux centres de production de l'acier sont :

Nord	91849 tonnes.
Saône-et-Loire	64024
Meurthe-et-Moselle	61988
Loire	57918
Pas-de-Calais	49994
Gard	35446
Landes	34820
Ardennes	25684

Une grande partie de l'acier Bessemer est obtenue par la déphosphoration de fontes phosphoreuses suivant la méthode Thomas-Gilchrist (p. 751). Cela est surtout vrai en Meurthe-et-Moselle, dans les Ardennes, dans Saône-et-Loire.

Une fraction de l'acier Siemens-Martin, dans ce dernier département encore, ainsi que dans ceux du Doubs et du Jura, provient également de fontes phosphoreuses traitées d'après le procédé de Percy C. Gilchrist et de Sydney Gilchrist Thomas.

La production de l'acier brut, sous forme de simples lingots, se chiffre par 688991 tonnes en 1890 ; soit 444801 tonnes de lingots Bessemer et 244190 tonnes de lingots Siemens-Martin.

La quantité de ces lingots ou aciers bruts qui a été transformée en produits marchands se trouve comptée dans les totaux, notés plus haut, des aciers ouvrés.

Production métallurgique du monde entier. Fontes.

Angleterre	8425000	tonnes en	1889
Etats-Unis	7720000	—	1889
Allemagne	4000000	—	1888
France	1970000	—	1890
Autriche-Hongrie	750000	—	»
Belgique	710000	—	»
Russie	550000	—	»
Suède	475000	—	»
Espagne	133000	—	»
Italie	27000	—	»

Aciers. Production totale en 1884 : 6 millions de tonnes.

	En 1848.	Vers 1868-69.	Vers 1882-83.
France	15000 tonnes.	110000 tonnes.	418000 tonnes.
Angleterre	40000	500000	2100000
États-Unis	»	8000 (1)	2200000 (1)
Allemagne	»	»	500000

586. Emploi de la chaleur perdue des fours métallurgiques. La chaleur perdue dans ces fours se compose de celle provenant de ce que les

(1) Par le procédé Bessemer seulement.

gaz peuvent ne pas être complètement brûlés, et de celle due à la température de ces gaz. Lorsque les gaz sont complètement brûlés et à une haute température, comme dans les fourneaux à réverbère, les fours à puddler et à réchauffer, pour utiliser la chaleur perdue il suffit de placer, le plus près possible du four, afin de diminuer le refroidissement, une chaudière à vapeur, sous laquelle on fait circuler les gaz. Quand les gaz ne sont pas complètement brûlés, comme dans les hauts fourneaux, les cubilots, les fours à coke, on commence par brûler ces gaz en faisant arriver dans leur masse la quantité convenable d'air divisé en lames minces ou en jets d'un petit diamètre. Les gaz brûlant avec une longue flamme, on doit éviter dans ce cas les chaudières tubulaires, qui s'opposeraient à la combustion complète en éteignant la flamme. Voir : *De l'utilisation de la chaleur dans les fourneaux des usines métallurgiques*, par Gruner (*Annales des mines*, t. VIII, 1875).

587. Les gaz des hauts fourneaux (556) peuvent être employés pour les fours à réchauffer et à puddler, et pour le chauffage à 300° de l'air envoyé aux tuyères et celui des chaudières des machines soufflantes.

A la partie supérieure du haut fourneau, on dispose une trémie métallique en forme de tronc de cône à bases ouvertes; c'est dans cette trémie qu'on jette les chargements du haut fourneau, et dans l'espace qui la sépare de la cuve viennent se réunir les gaz. La trémie doit contenir encore un peu de matière quand on fait une nouvelle charge. Pour les hauts fourneaux d'un grand-diamètre au gueulard, Thomas et Laurens ont fermé le dessus de la trémie à l'aide d'un couvercle dont les bords plongent dans une rigole remplie d'eau qui règne sur tout le pourtour du haut de la trémie. Ce couvercle peut se lever facilement. Les chaudières se placent au niveau du sol, et les gaz sont amenés du gueulard par un tuyau vertical. Le tirage de la cheminée doit être faible, afin qu'il ne dérange pas l'allure du haut fourneau. Les chaudières doivent contenir de grands volumes d'eau et de vapeur, pour obvier aux irrégularités de production et de combustion des gaz. Quelquefois les gaz arrivent sous la chaudière par une large fente horizontale ou par un tuyau aplati à son extrémité, et l'air extérieur vient librement en dessous brûler la nappe de gaz; mais, par de bonnes dispositions de foyers, on peut avoir un excès de gaz pour chauffer les étuves, griller les minerais, dessécher le bois, etc.

Quand la température doit être suffisante pour le chauffage des chaudières à vapeur et de l'air d'alimentation des hauts fourneaux, Thomas et Laurens font arriver les gaz, seulement poussés par la pression intérieure du haut fourneau, dans une caisse placée dans la voûte recouvrant l'espace qu'occuperait la grille dans les foyers ordinaires, et de cette caisse les gaz s'échappent en lames minces inclinées, entre lesquelles l'air extérieur arrive également en lames minces de même direction que les premières. On a ainsi un foyer à flamme renversée, disposition avantageuse.

Pour les foyers à haute température (chauffage des fours métallurgiques), Thomas et Laurens font arriver les gaz dans une caisse en fonte

dont la paroi en contact avec le foyer est légèrement inclinée avec la verticale, et percée d'un grand nombre de trous par lesquels les gaz entrent dans le foyer en jets légèrement plongeants. L'air arrive dans une caisse en fonte placée derrière la première, et se rend dans le foyer par des petits tubes en fer qui traversent la caisse à gaz et le lancent en jets intérieurs et concentriques aux jets de gaz. L'air est fourni par une machine soufflante et se trouve à la pression de $0^m,15$ à $0^m,20$ d'eau; la pression des gaz est $0^m,03$ à $0^m,06$ d'eau. L'air, en traversant des tubes en fonte chauffés par la chaleur perdue du four (591), est amené à la température de 300 à 400°; les gaz sont chauffés à 200 et 300°.

Dans les foyers à gaz, près de l'arrivée des gaz sous la chaudière, on dispose un petit foyer destiné à les allumer et à entretenir leur combustion. Avant l'allumage et après chaque interruption de chauffage, on fait écouler les gaz par un tuyau latéral, afin d'éviter les explosions dans les carneaux. Il est prudent de munir l'extrémité du tuyau d'accès des gaz de larges soupapes de sûreté se soulevant en dehors, ou mieux de soupapes à eau disposées dans les caisses servant au nettoyage des gaz.

Les gaz sortant du gueulard des hauts fourneaux de Clairval et d'Audincourt, marchant au charbon de bois, sont composés, en poids, de 0,1835 d'acide carbonique, 0,2224 d'oxyde de carbone, 0,0041 d'hydrogène, et 0,5730 d'azote (d'après Ebelmen). La puissance calorifique de ces gaz est alors (539) :

$$2\,403 \times 0{,}2224 + 29\,512 \times 0{,}0041 = 655{,}43.$$

La chaleur nécessaire pour élever de 1° la température du gaz résultant de la combustion est (488) :

Pour l'acide carbonique du gaz avant la combustion	$0{,}1835 \times 0{,}216 = 0{,}0396$
Pour l'azote du gaz avant la combustion.	$0{,}5730 \times 0{,}244 = 0{,}1398$
Pour l'acide carbonique formé à la combustion	$0{,}3494 \times 0{,}216 = 0{,}0754$
Pour la vapeur d'eau	$0{,}0360 \times 0{,}475 = 0{,}0171$
Pour l'azote introduit par l'air.	$0{,}4256 \times 0{,}244 = 0{,}1048$
Pour la totalité du gaz	0,3767

La température des gaz après la combustion est donc, en supposant qu'il n'y a aucune déperdition de chaleur, et que la combustion s'effectue avec la quantité d'air rigoureusement nécessaire :

$$\frac{655{,}43}{0{,}3767} = 1740°.$$

Pour les gaz d'un haut fourneau au coke, on obtiendrait les mêmes résultats. D'après Ebelmen, les gaz d'un haut fourneau de Vienne, au coke et de 11 mètres de haut, contiennent 0,37, 0,33, 0,32 et 0,25 d'oxyde de carbone, selon qu'ils sont pris à $0^m,62$ au-dessus des tuyères, à $4^m,36$ au-dessus de ces tuyères, à 1 mètre au-dessous du gueulard et au gueulard. La température des gaz au gueulard varie de 100° à 200° ou

de 360° à 400°, selon que le haut fourneau marche au charbon de bois ou au coke. Ces températures augmentent rapidement du gueulard aux tuyères.

D'après Thomas et Laurens, une machine à vapeur à détente et condensation de la force de 18 chevaux, dont la chaudière était chauffée par les gaz d'un haut fourneau au charbon de bois, a donné de bons résultats, la section de la cheminée et des carneaux étant de 28 décimètres carrés, la hauteur de la cheminée 8 mètres, et la surface de chauffe calculée sur une production de 15 à 17 kilog. de vapeur par mètre carré.

Le haut fourneau de Niederbronn fournit, par l'emploi de ses gaz, la vapeur à une machine de Woolf de 12 à 15 chevaux, qui conduit une soufflerie, et la vapeur produite étant à 2,5 atmosphères, les 200 kilog. de charbon de bois brûlés par heure ont donné 284700 calories en vapeur produite, c'est-à-dire un effet utile de 20 p. 100 et une puissance de 20 chevaux (591). Voir : *Étude sur les hauts fourneaux*, par Gruner (*Annales des mines*, t. II, 1872).

588. Gaz d'un cubilot (557). D'après Ebelmen, les gaz recueillis au gueulard d'un cubilot de 3 mètres de hauteur, marchant au coke, renferment 0,09 à 0,14 d'oxyde de carbone, 0,09 à 0,19 d'hydrogène carboné, 0,0038 à 0,115 d'hydrogène, 0,71 à 0,75 d'azote. Adoptant les moyennes de ces nombres, on trouve que la puissance calorifique des gaz est à peu près les 2/3 de la puissance calorifique du combustible employé.

589. Dans *un four à coke*, par suite de la température des gaz sortant du four, et de ce que le tiers environ de ces gaz n'est pas brûlé, la perte totale de chaleur est les 0,40 de la chaleur que la houille soumise à la carbonisation est susceptible de produire. En plaçant la chaudière très près du four pour éviter le refroidissement des gaz, et en terminant de brûler ces gaz en faisant arriver dans leur masse une quantité convenable d'air divisé en jets, la puissance de la chaudière, ses dimensions et celles de la cheminée sont les mêmes que si l'on brûlait sur une grille les 0,40 de la houille soumise à la distillation. Le tirage de la cheminée ne doit pas être assez grand pour changer en rien l'allure des fours; car le coke se brûlerait en partie, il deviendrait léger et perdrait une de ses qualités essentielles. Par certaines dispositions, on peut régler convenablement l'arrivée de l'air et le tirage.

590. Fours à puddler et à réchauffer (586). Un four à puddler consomme moyennement 85 kilog. de houille à l'heure, et un four à réchauffer de 100 à 110 kilog. La section de la cheminée de ces fours est ordinairement d'un décimètre carré pour une consommation de 4 kilog. à 4^k,5 de houille à l'heure (542 et 544), et la section de la grille, de 4 décimètres carrés pour la même consommation (742).

Quand un four à puddler ou à réchauffer est muni d'une chaudière à vapeur, il faut, d'après Grouvelle, que la section de la cheminée et des carneaux soit d'un décimètre carré pour une consommation de 3 kilog. à 3^k,30 de houille à l'heure. D'après M. Lucas-Championnière, il y aurait

utilité à augmenter cette section : car, au-dessus de 3 kilog. par décimètre carré, le tirage et le travail souffrent toujours; aussi doit-on porter la section à un décimètre carré pour $2^k,7$ de houille. La hauteur de la cheminée varie de 12 à 15 mètres, même quand il y a une chaudière. Pour les fours à réchauffer, il convient également d'adopter les proportions précédentes, en ayant égard à la plus grande consommation de charbon.

La surface de chauffe peut être la même que si le charbon était brûlé directement sous la chaudière. Il résulte aussi que la production des chaudières placées à la suite des fours à réchauffer est de 4 à 5 kilog. de vapeur à 5 atmosphères, par kilogramme de houille brûlée, et que celle des chaudières placées à la suite des fours à puddler est de 3 kilog. à $3^k,5$; mais, d'après Péclet, ces dernières produisent de 4 à 5 kilog. de vapeur par kilogramme de houille, et chaque mètre carré de surface de chauffe fournit de 16 à 18 kilog. de vapeur à l'heure (voir plus loin: CHAUDIÈRES).

On peut compter, ajoute Grouvelle, qu'un four à réchauffer consommant 110 kilog. de houille produit environ 520 kilog. de vapeur à l'heure, et qu'un four à puddler en produit à peu près 300 kilog. pour 90 kilog. de houille brûlés sur la grille; ce qui correspond à une force de 25 chevaux pour le premier four et de 15 pour le second, en admettant que la machine soit à détente sans condensation et consomme 20 kilog. de vapeur par cheval. Pour une machine à détente et condensation consommant 15 kilog. de vapeur environ par cheval, la puissance est de 30 à 35 chevaux pour le four à réchauffer et de 20 chevaux pour le four à puddler. Cet auteur admet de plus que deux fours à réchauffer, travaillant en échantillons différents, donnent de la vapeur en quantité largement suffisante pour leur travail au laminoir, et que le four à puddler suffit également au travail du cinglage, soit au marteau, soit au laminoir.

D'après Thomas et Laurens, sur un feu d'affinerie marchant au charbon de bois, et produisant de 22 à 24 tonnes de fer par mois, on peut placer une chaudière à vapeur ayant 16 mètres carrés de surface de chauffe, et produire de 150 à 180 kilog. de vapeur à l'heure, même en plaçant entre le four à affiner et la chaudière un petit four destiné à commencer le chauffage de la fonte à affiner, ou à chauffer le fer à étirer.

591. Chauffage du vent des fours métallurgiques. Extrait d'une notice sur les appareils à air chaud, par Gruner (*Annales des mines*, t. II, 1872). Aujourd'hui il est des hauts fourneaux, dans le Cleveland surtout, dont le vent est porté à 600 et 800°. Tant que la température du vent ne doit pas dépasser 600°, on peut se servir d'appareils en fonte pour le chauffer, pourvu qu'on leur donne une section et une surface de chauffe suffisamment étendues. Mais lorsqu'on veut atteindre 7 à 800°, il faut des appareils en terre réfractaire *Cowper-Siemens* et *Whitwell*, fondés sur le principe de la chaleur régénérée (592).

Appareils en fonte. Lorsqu'on n'a à chauffer que de faibles quantités

de vent, 20 à 30 mètres cubes, par exemple, par minute et par appareil, on peut faire passer *toute* la masse de vent au travers d'une *seule* ligne de tuyaux d'une grande longueur, ou bien diviser le volume total en 8, 10, 12 parties égales, et ne faire circuler chacune de ces fractions qu'au travers d'un tube relativement *court*. On doit donner aux conduits une section assez grande pour que la vitesse du vent n'y dépasse pas certaines limites. A l'origine, dans les appareils à tuyau unique, cette vitesse atteignait souvent, mesurée *à froid*, 20 à 25 mètres par seconde, soit 30 à 35 mètres dès que le vent se trouvait chauffé vers 150 à 180°. C'est trop; la perte de pression est alors considérable. Lorsqu'on veut chauffer le vent jusqu'à 300°, on ne devrait jamais aller au delà de 10 mètres (*à froid*), et même seulement à 5 ou 6 mètres lorsque la température doit s'élever à 5 ou 600°. On doit proportionner la surface de chauffe à la température et à la masse de vent. Au début, les surfaces, comme les sections, étaient insuffisantes. Les premiers appareils Taylor n'avaient que 0^{mq},50 à 0^{mq},60 de surface de chauffe par mètre cube de vent à chauffer par minute. Dans ces conditions, on arrive difficilement à 200°.

Tous les appareils destinés aux températures de 300 à 350° ont une surface de chauffe de 1^{mq},00 à ^{mq},50 par mètre cube à chauffer par minute. Mais, pour réaliser sans embarras des températures de 500 à 600°, il faut arriver à 4 et même 5 mètres carrés; c'est le chiffre adopté dans les appareils modernes du Cleveland. Ainsi les hauts fourneaux d'*Ayresome* reçoivent 150 à 160 mètres cubes chauffés par 800 mètres carrés, soit 5 à 5^{mq},30 par mètre cube pour des températures de 600 à 620°.

La vitesse du vent et la surface de chauffe une fois arrêtées, il faut choisir entre les deux systèmes ci-dessus indiqués : un courant *unique* ou des conduits *multiples*, ou bien une sorte de système *mixte*. On a surtout recours à ce dernier mode lorsque la masse de vent est considérable, tandis qu'on se sert de l'un des deux premiers systèmes lorsque le volume par minute et par appareil ne dépasse pas 30 mètres cubes.

Les appareils-types *Wasseralfingen* et *Calder* sont généralement employés dans ce dernier cas : le premier surtout en Suède et en Westphalie; le second, en Angleterre et en France; on nomme aussi ce dernier : appareil à *siphons*, à *pistolets*, etc., selon les formes particulières des tubes de fonte.

L'appareil de *Wasseralfingen* se compose de tuyaux horizontaux, reliés par des coudes; le second, de tuyaux verticaux, ou fortement inclinés, dont les bouts inférieurs sont implantés dans les tubulures de deux caisses horizontales, dont l'une reçoit l'air froid, tandis que l'autre sert de réceptacle au vent qui vient de se chauffer dans les tuyaux divisés.

Au *Pouzin*, en 1857, pour chauffer le vent à 290°, on se servait de l'appareil *Wasseralfingen* à conduit *unique*. Ce conduit avait 0^{m},20 de diamètre intérieur et 36 mètres de longueur; la surface de chauffe était de 30 mètres carrés pour 25 mètres cubes de vent, soit 1^{mq},20 par mètre cube; à froid, la vitesse du vent était de 13 mètres par seconde.

A *la Voulte*, on faisait usage de l'appareil Calder à 9 siphons verticaux de chacun 7 mètres de longueur et $0^m,10$ de diamètre intérieur. La surface de chauffe était également d'environ 30 mètres carrés pour 25 mètres cubes de vent, par appareil et tuyère.

Les tuyaux horizontaux, pour ne pas fléchir sous leur propre poids, ne peuvent avoir plus de 2 mètres de longueur. Chaque tuyau exige deux joints, soit 36 au Pouzin pour 18 à la Voulte; il en résulte des chances de fuite. Pour tous les appareils à air chaud en fonte, on ne peut employer que des joints à *emboîtement*, avec ciment formé d'un mélange de limaille de fonte et d'argile humectée d'acide acétique. Les appareils à tuyaux horizontaux ne peuvent être chauffés qu'au gaz; en se servant d'un foyer à houille, les tuyaux de la rangée inférieure seraient promptement brûlés. Enfin, les tubes horizontaux ont l'inconvénient de se couvrir plus facilement de poussière, et d'exiger pour ce motif des nettoyages plus fréquents. On remédie à cet inconvénient, et l'on augmente en même temps la résistance à la flexion en donnant aux tubes une section aplatie, le grand axe étant vertical; c'est la forme adoptée en Westphalie. La forme méplate a l'avantage d'agrandir la surface de chauffe, à vitesse égale de vent. C'est la raison qui l'a fait adopter dans les appareils à tuyaux multiples, malgré le frottement plus grand qui en résulte.

Deux conditions restent encore à remplir pour avoir un bon appareil à air chaud. Il faut adopter le chauffage *méthodique*, et augmenter la section des tuyaux proportionnellement au volume dilaté du vent.

Le chauffage *méthodique* (716), c'est-à-dire la marche *inverse* des gaz qui chauffent et des corps que l'on veut chauffer, peut être mieux réalisé dans l'appareil Wasseralfingen que dans le système Calder. On fait entrer l'air froid par le tuyau le plus élevé et sortir l'air chaud par le bout le plus voisin du lieu de combustion des gaz. Quant à la section graduée des tubes, on peut facilement la réaliser dans les deux appareils : dans celui de *Wasseralfingen*, en augmentant le diamètre des tuyaux inférieurs, ou en les bifurquant, ainsi que cela se voit dans quelques usines du pays de Siegen; dans celui de *Calder*, en donnant aux siphons un profil légèrement conique. Mais cette double condition du chauffage *méthodique* et des sections *graduées* se réalise surtout bien dans quelques appareils du système *mixte*.

Appareil mixte à tube unique. On trouve deux exemples de ce système dans les usines du Cleveland, celles d'*Ayresome* et de *Newport*. Le vent se partage entre plusieurs appareils, composés chacun d'une caisse horizontale rectangulaire munie de tubulures reliées de deux en deux par des tubes en ∩. Dans la caisse horizontale, entre les deux tubulures de chaque siphon se trouve une cloison transversale. Il en résulte que le même air est obligé de parcourir successivement tous les siphons implantés sur la même caisse. Ces siphons, qui constituent au fond un système à tuyau unique, sont à section méplate, afin d'augmenter la surface de chauffe. Cette section reste constante d'un bout à l'autre de l'appareil, quoiqu'il eût été facile d'appliquer ici le précepte des tubes

à section croissante. Une même enceinte renferme deux tels appareils, indépendants l'un de l'autre, à caisses parallèles et à siphons inclinés latéralement de manière qu'au sommet ceux d'un appareil s'appuient contre ceux de l'autre. Le foyer à gaz est placé entre les deux appareils d'une même enceinte, du côté par où sort le vent chaud, en vue de réaliser le chauffage méthodique.

A l'usine d'Ayresome, il y a 6 foyers ou 12 appareils, de sorte que la masse d'air à chauffer se partage en 12 courants distincts, qui ne se confondent que dans le conduit général menant aux tuyères. Chaque siphon a $4^{m},80$ de hauteur, ou $9^{m},60$ de développement; un appareil en renferme 7; par suite, la longueur totale du conduit est de 67 mètres. La section intérieure mesure $0^{m},44$ sur $0^{m},08$, soit $0^{mq},0352$. Le périmètre correspondant est de $1^{m},04$, ce qui donne comme surface de chauffe $1,04 \times 67 = 69^{mq},48$.

Le volume à chauffer est de 150^{mc} pour les 12 appareils, soit $12^{mc},5$ par appareil simple et par minute, ou $0^{mc},208$ par seconde, ce qui donne comme vitesse du vent froid $\frac{0,208}{0,0352} = 5^{m},90$, ou environ 18 à 20 mètres dans le dernier siphon, que le vent abandonne à la température de 600 à 620°. La surface de chauffe par mètre cube et minute est $\frac{69,48}{12,50} = 5^{mq},50$. Mais chaque appareil doit pouvoir chauffer au besoin 14 mètres cubes par minute (168 mètres cubes pour l'ensemble), ce qui ramène la surface de chauffe à 5 mètres carrés.

A l'usine de Newport, il y a 9 appareils doubles par haut fourneau, dont 8 constamment en marche. Le vent se partage donc en 16 courants. Le volume total étant de 200^{mc}, chaque conduit en reçoit par minute $\frac{200}{16} = 12^{mc},50$, comme à Ayresome. Mais chaque appareil ne renferme que 6 siphons au lieu de 7, ce qui réduit la longueur totale du parcours à 58 mètres, chaque tube recourbé ayant la même hauteur qu'à l'usine d'Ayresome. La section intérieure est moins aplatie; elle mesure $0^{m},42$ sur $0^{m},10$ ou $0^{mq},0420$. Le périmètre est, comme à Ayresome, de $1^{m},04$, d'où une surface de chauffe, par appareil, de 60 mètres carrés; soit, par mètre cube et par minute, $\frac{60}{12,5} = 4^{mq},80$. C'est un peu moins qu'à Ayresome, mais aussi on se borne à chauffer le vent à 590°, au plus 600°. La vitesse du vent, mesurée à froid, atteint $\frac{0,208}{0,042} = 4^{m},95$. On voit que les appareils de ces deux usines, en ce qui concerne la vitesse du courant et la surface de chauffe, sont dans de bonnes conditions; mais on pourrait les améliorer en leur appliquant, en outre, le chauffage méthodique et l'accroissement progressif des siphons.

Appareils mixtes à conduits multiples. Un appareil mixte, à chauffage méthodique, formé de tuyaux multiples à section croissante, se trouve installé à Bessèges, à l'usine de la Rochette de Givors, à Terre-Noire, etc.

Un appareil, brûlant 30 tonnes de coke par 24 heures, se compose de

36 tuyaux verticaux, à cloisons intérieures, dressés sur deux caisses rectangulaires encastrées horizontalement dans la maçonnerie de la sole du four; chaque tube vertical est de section méplate ou ovale, ayant intérieurement 0^{m},40 sur 0^{m},20. La cloison intérieure laisse au sommet du tube une communication libre entre les deux moitiés. La longueur des tuyaux verticaux est de 2^{m},90. Le fourneau lui-même mesure intérieurement 5^{m},35 en longueur, 3^{m},50 en largeur et 3^{m},90 en hauteur, celle-ci étant comptée du bas des caisses et comprenant la couverture du four; les murs du pourtour ont 0^{m},45 d'épaisseur. Le vide intérieur des caisses rectangulaires a 0^{m},60 de hauteur sur autant de largeur; ces caisses sont divisées en deux, dans le sens de leur longueur, par une forte paroi venue de fonte, sur laquelle viennent s'appuyer les cloisons intérieures des tuyaux verticaux. La première caisse, dont la longueur est de 5^{m},25, porte 20 tuyaux, espacés de 0^{m},26 d'axe en axe. La seconde caisse, placée parallèlement à la première et à sa gauche, mesure 4^{m},20; elle porte 16 tuyaux. L'air froid pénètre par le bout d'avant dans le compartiment de gauche de la première caisse; ce compartiment est lui-même divisé en deux par une cloison transversale placée après le 9e tube; l'air passe du compartiment de gauche dans celui de droite en parcourant simultanément ces 9 premiers tubes; de ce dernier compartiment, qui est sans cloison transversale, l'air passe dans la partie postérieure du compartiment de gauche en traversant simultanément les 11 tuyaux suivants. Après ce double trajet, l'air arrive par un tuyau dans le compartiment de droite de la deuxième caisse, où il est chauffé une troisième fois, en se rendant, par les 16 derniers tuyaux, dans le compartiment de gauche de cette deuxième caisse. De là le vent chaud s'écoule enfin vers la tuyère par le tuyau porte-vent.

Les gaz du haut fourneau brûlent sur une grille placée dans la partie antérieure du fourneau, en avant de la seconde caisse, puis circulent au travers du fourneau, en sens inverse de la marche du vent, pour venir à la cheminée placée à côté de la grille. Le chauffage, on le voit, est réellement méthodique, et le vent passe par des tuyaux à section totale croissante. La surface de chauffe intérieure de chaque tube est de 2^{m},80, ce qui fait 100^{mq},80 pour les 36 tuyaux. Pour les 30 tonnes de coke par 24 heures, le volume de vent par minute est de 70 mètres cubes, soit une surface de chauffe de 1^{mq},45 par mètre cube. La température du vent est de 375°. La vitesse à froid, dans les 9 premiers tuyaux, est de 6^{m},50; par suite, celle du vent chaud, dans les 16 derniers siphons, reste au-dessous de 10 mètres. Toutes ces conditions sont favorables à une bonne marche.

Ce système, où un appareil unique fournit le vent chaud à toutes les tuyères, est préférable au mode ancien, d'après lequel chaque tuyère a son appareil spécial. Ce dernier arrangement n'offre que l'avantage d'un trajet plus court entre la tuyère et l'appareil à air chaud. Un grand appareil utilise mieux la chaleur, fournit aux diverses tuyères un vent également chaud et permet de réduire les frais de construction. On

peut même ajouter qu'un grand appareil intervient en quelque sorte comme *régulateur* de la chaleur. Les variations brusques dans la nature des gaz réagissent d'autant moins sur la température du vent, que la masse de briques dont se compose le four est plus considérable. Sous tous ces rapports, l'appareil de Bessèges mérite la préférence sur ceux de Newport et d'Ayresome. Mais, comme *régulateurs* de chaleur, on doit surtout signaler les appareils en *briques* Siemens (592).

Appareils en terre réfractaire. Lorsqu'on veut dépasser 600°, il faut substituer la terre réfractaire à la fonte; mais comme l'argile cuite est peu conductrice de la chaleur, on ne peut s'en servir avec avantage sous forme de tuyaux, même s'il était possible de les rendre parfaitement étanches. Il faut donc avoir recours au principe des fours Siemens. M. Cowper a le premier réalisé ce mode de chauffage, en 1860, dans l'usine de MM. Cochrane et Ce, à Ormesby (Cleveland). En 1865 M. Withwell, maître de forges à Stokton on Tees, construisit un appareil basé sur le même principe. Chaque appareil, Cowper ou Withwell, est renfermé dans une vaste tour cylindrique, rendue étanche, comme les régulateurs à vent, par une enveloppe de feuilles de tôle de 0^{m},007 à 0^{m},008 d'épaisseur. La surface intérieure est garnie d'un mur en briques réfractaires qui doit protéger la tôle et conserver la chaleur. On remplit cette vaste enceinte de briques réfractaires qui doivent tour à tour absorber, puis céder la chaleur. Pour chauffer le vent, il faut deux appareils identiques : dans l'un d'eux, on chauffe les briques, tandis que les briques chaudes de l'autre abandonnent au vent la chaleur précédemment absorbée. Toutes les heures, ou toutes les deux heures, on intervertit le jeu du double appareil, comme dans les fours Siemens ordinaires. Il faut donc que les briques emmagasinent assez de chaleur pour chauffer le vent au même degré, pendant ce laps de temps d'une ou deux heures; d'où il suit que la surface de chauffe et la masse des briques doivent être beaucoup plus grandes dans les appareils nouveaux que dans les anciens, et cela malgré la chaleur spécifique élevée de l'argile, qui est presque double de celle de la fonte. Tandis que les surfaces de chauffe des appareils en fonte sont de 0^{mq},50 dans les plus anciens, et de 5 mètres carrés dans les plus modernes, par mètre cube de vent à chauffer par minute, on trouve dans l'appareil Whitwell 7 à 8 mètres carrés, et dans le four Cowper-Siemens jusqu'à 18 et 20 mètres carrés. Le poids des briques, par mètre cube de vent à chauffer par minute, est de 3000 kilog., lorsque, dans les appareils formés de tuyaux, on trouve au maximum 1000 kilog. de fonte, et le plus souvent, dans les appareils ordinaires, pas au delà de 3 à 400 kilog. Enfin, la vitesse du vent doit être moins considérable dans les appareils en terre réfractaire, à cause de la moindre conductibilité de l'argile pour la chaleur.

On ne trouve, en effet, pour la vitesse à froid que 1^{m},50 à 2 mètres dans le four Whitwell, et seulement 0^{m},15 à 0^{m},20 dans le four Cowper-Siemens. Cette différence de vitesse entre les deux appareils est d'ailleurs rachetée par une différence énorme dans l'étendue du parcours.

Ce dernier est de 60 mètres dans le four Whitwell, contre 16 mètres, ou même 8 à 9 mètres, dans l'appareil Cowper. Les deux appareils diffèrent surtout l'un de l'autre par le mode d'arrangement des briques qui remplissent l'enceinte. Dans le four Whitwell, elles forment *un grand conduit unique*, une sorte de long serpentin à branches verticales; dans le four Cowper, *un nombre considérable de canaux étroits*, relativement courts. On peut donc assimiler le premier au système Wasseralfingen, le second à l'appareil Calder.

Gruner cite un appareil Cowper-Siemens destiné à chauffer 150 à 180 mètres cubes d'air par minute vers 800°, et un appareil Whitwell pour chauffer 100 mètres cubes par minute vers 750 à 800°, pour une production d'environ 40 tonnes de fonte par 24 heures.

592. Fours Siemens et Ponsard (*Traité de métallurgie*, par Gruner). Au lieu de tubes en fonte pour le chauffage de l'air (587, 591), on peut se servir de briques réfractaires pour transmettre la chaleur par conductibilité. Mais, à cause de la porosité des briques et des nombreux joints, on ne peut réaliser des canaux *étanches*, dès que la pression de l'air devient forte. Leur emploi est forcément borné au cas où l'air est amené dans les foyers par simple aspiration. C'est le principe des fours *Boëtius*, *Ponsard*, etc., principe mentionné par F. Siemens dans son premier brevet anglais, du 2 décembre 1856.

Le four Boëtius est un générateur à doubles parois, entre lesquelles circule l'air, qui doit plus tard brûler les produits du *gazogène*. On utilise ainsi, dans ce foyer pour le chauffage de l'air de combustion, la chaleur qui se perd, dans les foyers ordinaires, par transmission directe, au travers des parois.

Le procédé *Ponsard* consiste à faire passer les produits de la combustion par une série nombreuse de carneaux parallèles, reliant le laboratoire à la cheminée. Ces carneaux sont à minces parois et isolés les uns des autres par des conduits semblables, que parcourt, en sens inverse, l'air aspiré par le foyer. On utilise ainsi, par voie de chauffage méthodique, une partie de la chaleur qui, dans les fourneaux ordinaires, se dissipe en pure perte par les cheminées. (Voir dans les *Mémoires de la Société des Ingénieurs civils* (1874) une étude de M. S. Périssé, sur le four Ponsard.)

La seconde classe d'appareils de chauffage des gaz dont on se sert dans les usines métallurgiques, est fondée sur le principe de la *régénération* de la chaleur (Siemens). Ils se composent de deux conduits multiples en briques réfractaires, que quatre valves font parcourir tour à tour, en *sens inverse*, par les gaz brûlés à leur sortie du four, et qui cèdent leur chaleur avant de se rendre à la cheminée, et par l'air, qui l'enlève à son tour aux parois du canal avant de venir, chaud qu'il est alors, brûler les gaz qui sortent du gazogène pour entrer dans le four. C'est le chauffage *méthodique* dans toute sa rigueur (p. 766). Un des conduits multiples s'échauffe ou se refroidit pendant que respectivement l'autre se refroidit ou s'échauffe, effet qu'on obtientà l'aide des valves. En donnant à ces conduits une longueur suffisante, et aux gaz chauds une

vitesse faible, on peut abandonner ceux-ci presque froids, tandis que l'air, que l'on se propose de chauffer, parcourt de proche en proche des régions graduellement plus chaudes.

Les appareils de chauffage sont de deux sortes, selon que l'air et les gaz, qu'il s'agit de chauffer, sont à *faible* ou à *haute* tension.

Lorsque la tension est faible, on peut se contenter de chambres ou de conduits en briques réfractaires ordinaires; lorsqu'elle est forte, il faut renfermer le système entier dans une enveloppe *étanche*, en tôle de fer; c'est le cas du vent *comprimé* des machines soufflantes.

Le premier mode suffit, lorsque l'air ou les gaz, que l'on veut chauffer, sont simplement *aspirés* par une cheminée, ou faiblement poussés par un ventilateur de vitesse modérée.

Le principe de la régénération de la chaleur a été appliqué, pour la première fois, en 1860, au chauffage du vent à *haute* pression, par M. Cowper, dans l'usine d'Ormesby (Cleveland) (591).

Le gazogène Siemens est à air libre, avec plan incliné pour faciliter la descente du combustible, et grille en gradins, élément important de la réalisation pratique du chauffage au gaz. Siemens emploie, dans certains cas, une grille inférieure, qui existe toujours dans le gazogène ordinaire Ponsard.

L'une des applications les plus importantes des fours Siemens est leur emploi pour la fabrication de l'acier (568).

593. *M. Boistel* (*Société des ingénieurs civils*, 16 avril 1875), indique ainsi les recherches de Siemens :

Au sujet du récupérateur, MM. Siemens ont essayé une disposition suivant laquelle l'air est seul chauffé par échange de température à travers des cloisons réfractaires; mais ils ont été conduits à l'éloignement des gazogènes, et à l'inversion des courants, qui est un régulateur de la répartition de la chaleur dans toute la capacité du four. On peut citer à l'appui les fours de glaceries, qui ont une longueur intérieure de plus de 11 mètres, et les fours d'Ebbw-Vale, qui ont 6^m,50 et huit portes, et dans lesquels on réchauffe 72 tonnes de lingots Bessemer en 24 heures, avec une consommation de houille de 175 kilog. par tonne d'acier.

Il n'est plus un seul four destiné à la fabrication des glaces qui ne soit chauffé par les procédés Siemens; l'application de ces procédés s'est moins répandue dans la fabrication du verre à vitres et des bouteilles. Cependant le nouveau mode de fusion et de fabrication du verre, sur la sole d'un four, et d'une façon continue, donne sur les anciens procédés une économie de 50 à 70 p. 100. D'après Siemens, le départ du silicium et du carbone de la fonte, dans le puddlage ordinaire, est entièrement dû à l'action des oxydes de fer fluides contenus dans le bain, et ce bain s'augmente d'une quantité équivalente de fer mécanique, réduit de ces oxydes. Elle prouve qu'on peut puddler sur une sole en silice. L'emploi de l'hématite pour le garnissage des soles a pour effet d'obtenir une quantité de fer supérieure au poids de la fonte, si l'on a soin de fournir au bain une proportion suffisante d'oxyde. Il y a, dans les fours à puddler ordinaires, un écart considérable entre la quantité théorique

et celle produite réellement. Cela tient à la facilité d'absorption du soufre, et de l'oxygène par le fer à l'état d'éponge; l'emploi des fours Siemens réduit de beaucoup cet écart. Malgré la présence de chaudières placées sur les fours, on obtient une économie journalière de 65 francs par four des nouveaux procédés sur les anciens.

Les fours à réchauffer le fer donnent une économie de 3 à 5 p. 100 sur les déchets, et de 50 p. 100 sur le combustible.

DISTILLATION. FABRICATION DE L'ALCOOL, DU SUCRE ET DE LA BIÈRE

594. Généralités. La distillation a pour but de séparer une substance volatile d'une ou plusieurs autres substances fixes, ou volatiles à des températures différentes.

Pour ce mode de vaporisation, les dimensions des chaudières dépendent de la quantité de vapeur à former dans un temps donné, de la température d'ébullition du liquide (491), de sa chaleur latente de vaporisation (490) et de sa capacité calorifique, ainsi que de celle du résidu (487 et 488). De ces divers éléments, on déduit aussi la quantité de combustible à brûler (539), et par suite la surface de la grille (742) et la section de la cheminée (542 et 544).

Les surfaces de chauffe nécessaires pour vaporiser, dans un même temps, un même poids d'un liquide quelconque et d'eau sont dans le rapport des quantités de chaleur absorbées pour échauffer et vaporiser les deux liquides. Quand il y a plusieurs liquides à vaporiser à la fois, ce qui a lieu généralement, la quantité totale de charbon à brûler est égale à celle nécessaire pour vaporiser tous les liquides séparément, et amener le résidu à la température d'ébullition. La surface de chauffe est aussi égale à la surface que nécessiteraient la vaporisation de tous les liquides en particulier et l'échauffement du résidu.

1er *Exemple. Soit à vaporiser, en une heure*, 150 *kilog. d'alcool pur à la température primitive de* 0°.

La température d'ébullition de l'alcool sous la pression atmosphérique $0^m,76$ étant $78°,41$, sa capacité calorifique 0,622, et sa chaleur latente de vaporisation 207, la quantité de chaleur nécessaire pour en vaporiser 1 kilog. est :

$$78{,}41 \times 0{,}622 + 207 = 256 \text{ unités},$$

c'est-à-dire à peu près les 4/10 de celle nécessaire pour vaporiser 1 kilog. d'eau préalablement à 0° (490).

Un kilog. de houille vaporisant 6 kilog. d'eau, il vaporisera donc $6 \times \frac{10}{4} = 15$ kilog. d'alcool.

1 mètre carré de surface de chauffe vaporisant de 15 à 20 kilog. d'eau, il vaporisera donc de $15 \times \frac{10}{4} = 38$ à $20 \times \frac{10}{4} = 50$ kilog. d'acool. En

supposant seulement 38 kilog., les 150 kilog. d'alcool à 0° exigeront $\frac{150}{38} = 4^{mq},95$ de surface de chauffe, et la quantité de houille brûlée sera $\frac{150}{15} = 10$ kilog.

2° *Exemple. Soit à distiller en une heure* 500 *litres d'un vin dans lequel les quantités d'alcool et d'eau sont dans le rapport de* 1 *à* 22,8. L'expérience prouve que pour obtenir presque tout l'alcool, il faut vaporiser les 0,22 de la masse totale, ce qui donne 110 litres d'une liqueur composée de 21 litres d'alcool et de 89 litres d'eau.

La quantité de houille à brûler est alors :

Pour vaporiser les $0,795 \times 21 = 16,69$ kilog. d'alcool (465)	$\frac{16,69}{15} =$	$1^{kg},11$
Pour vaporiser les 89 kilog, d'eau.	$\frac{89}{6} =$	14 ,83
Pour élever à 100° les 390 kilog. de résidu	$\frac{100 \times 390}{650 \times 6} =$	10 ,00
Total.		$25^{kg},94$

$25^{k},94$ de houille pouvant vaporiser $25^{kg},94 \times 6 = 155^{kg},64$ d'eau, la surface de chauffe nécessaire pour distiller les 500 litres de vin sera donc de $\frac{155,63}{15} = 10^{mq},38$.

595. Alcool et eau-de-vie. L'alcool est produit par la fermentation vineuse ou alcoolique des liqueurs sucrées ou amylacées. L'eau-de-vie est un mélange d'eau et d'alcool, que l'on obtient en soumettant ces liqueurs fermentées à une distillation partielle. Le sucre est la seule substance qui se transforme en alcool par la fermentation; l'amidon se transforme d'abord en sucre de raisin (p. 566). Beaucoup de *sucs végétaux sucrés* sont employés à la fabrication de l'eau-de-vie : tels sont le vin, le cidre, le poiré, etc.; le *vesou* ou jus exprimé de la canne à sucre contient 12 à 16 p. 100 de sucre et donne le *rhum;* le jus de cerise donne le *kirsch-wasser;* beaucoup de racines sucrées, telles que la betterave, la carotte, etc., donnent des liqueurs spiritueuses; on en peut retirer 10 à 12 p. 100 de la betterave.

Matières amylacées. Toutes les céréales propres à la fabrication de la *bière* (598) : le froment, le seigle, l'orge, servent à la fabrication de l'*eau-de-vie,* ainsi que le maïs; la quantité d'eau-de-vie qu'on en retire est proportionnelle à l'amidon qu'elles renferment; l'orge et le seigle sont les plus employés. La *pomme de terre,* en raison de son bas prix et de sa richesse en amidon, qui s'élève de 16 à 22 p. 100 de son poids, est très employée pour la fabrication de l'eau-de-vie (voir page 774).

Pour réaliser la fermentation alcoolique, on dissout les produits saccharins, puis on les met en présence de *levure de bière;* il se dégage alors de l'acide carbonique, tandis que la liqueur perd sa saveur sucrée et acquiert une odeur vineuse. Cette liqueur, distillée, donne de l'alcool étendu d'eau.

Préparation de l'alcool au moyen des pommes de terre. On se sert dans le cas où l'on emploie les pommes de terre de plusieurs méthodes. Voici celle de Pistorius : après avoir été lavées et cuites à la vapeur, les pommes de terre passent sous un broyeur formé de deux cylindres creux, à surface lisse, puis sont introduites dans la cuve de *saccharification*, avec addition convenable de malt et d'eau. Après 4 heures de séjour dans cette cuve, on refroidit les moûts dans des bacs spéciaux, puis on les introduit dans les cuves de *fermentation* où elles séjournent 2 à 3 jours. On passe alors à l'opération *distillatoire*, dans un appareil appelé *chauffe-vin* ou *avant-chauffeur*. Après le passage dans le *réfrigérant-condenseur*, la quantité de vinasse qui reste est de 170 litres environ par hectolitre de mélange de pommes de terre et de malt, et de 550 litres par 100 kilog. d'orge germée. Citons aussi les appareils de Savalle et de Coffey.

L'eau-de-vie qui sert de boisson contient généralement de 50 à 60 p. 100 en volume d'alcool pur, à la température de 15°; ce que dans le commerce on appelle *esprit* en contient de 70 à 80 p. 100, à la même température. Les vins du Midi donnent plus d'eau-de-vie que ceux du Nord; on en retire jusqu'à 1/3 des premiers, moyennement 1/4, au lieu que ceux du Centre n'en donnent que 1/5, et ceux du Nord seulement de 1/8 à 1/10. L'alcool absolu a pour formule $C^4H^6O^2$.

Lorsqu'on distille une matière quelconque, on dépense une certaine quantité de chaleur pour l'amener à la température d'ébullition. Dans un grand nombre de cas, on peut obtenir cette élévation de température au moyen de la chaleur provenant de la condensation des vapeurs, ce qui constitue une véritable économie de combustible.

596. Condensation des vapeurs. On peut admettre : 1° que pour une même vapeur la quantité condensée par une même surface est proportionnelle à la différence entre la température de la vapeur et celle de l'air ou de l'eau qui sert de réfrigérant; 2° que pour des vapeurs différentes les quantités condensées par une même surface et pour un même excès de température sont en raison inverse des quantités de chaleur contenue dans un même poids des vapeurs (490).

Quand l'eau est employée comme réfrigérant (605), on peut admettre que le poids de vapeur d'eau condensée par heure, par mètre carré et par chaque degré de la différence des températures, est $1^{kg},40$ pour les appareils à double fond dont l'air ne peut pas être facilement expulsé, et $2^{kg},95$ si l'air est facilement expulsé du double fond ou si l'appareil est à serpentin. Ce chiffre $2^{kg},95$ suppose que l'eau qui sert de réfrigérant n'arrive pas à l'ébullition; car s'il en est autrement, il s'élève à 8 ou 9 kilog. Si l'air est employé comme réfrigérant, la quantité de vapeur condensée varie dans une certaine mesure avec le diamètre des tuyaux et avec la position, plus ou moins favorable au renouvellement de l'air, que ces tuyaux occupent dans l'atmosphère; mais on peut compter moyennement sur une condensation de $1^{kg},50$ de vapeur d'eau par mètre carré et par heure, pour une différence de température de 75°, soit sur $0^{kg},02$ par degré de cette différence. La surface du condenseur doit

donc être environ 148 fois plus grande pour l'air que pour l'eau ; souvent même on la suppose 200 fois plus grande.

Partant de ces poids de vapeur d'eau condensée, en appliquant les deux lois précédentes on déterminera la quantité d'une vapeur quelconque ou d'un mélange de vapeurs qui sera condensée par 1 mètre carré de surface pour une différence de température donnée.

1er *Exemple*. La chaleur latente de la vapeur d'alcool pur étant 207 (490), celle de la vapeur d'eau étant 550, 1^{m^2} de surface de petit tuyau placé dans l'eau non en ébullition condensera $2,95 \times 550 : 207 = 7^k,84$ de vapeur d'alcool pur, par heure et pour une différence de température de 1°.

2e *Exemple*. L'alcool à 22° de Baumé contenant en poids 0,36 d'alcool pur et 0,64 d'eau, la vapeur de ce mélange a pour chaleur latente $550 \times 0,64 + 207 \times 0,36 = 427$; par conséquent, dans les conditions du premier exemple, 1^{m^2} de surface en condensera $2,95 \times 550 : 427 = 3^k,80$.

597. Fabrication du sucre. Le sucre ordinaire peut être regardé comme formé d'équivalents égaux de glucose et de lévulose. Sa formule est $C^{24}H^{22}O^{22}$. Industriellement, on l'extrait de la canne à sucre et de la betterave. Cette dernière contient de 10 à 15 p. 100 de sucre, en poids.

Les betteraves, bien lavées, sont soumises à l'action d'une *râpe* mécanique qui les réduit en pulpe. Cette pulpe, comprimée dans des sacs de laine par une presse hydraulique, abandonne son jus qu'on clarifie dans des chaudières de *défécation*, puis qu'on décolore par filtration à travers du noir animal, chauffé à la vapeur, dans les chaudières de *cuite*, où l'air est raréfié.

Quand la concentration est suffisante, on refroidit jusqu'à ce que le liquide commence à se cristalliser; on le verse alors dans des moules de forme conique reposant sur leur pointe. Cette pointe est percée d'un trou qu'on bouche pendant deux jours. On le débouche alors pour laisser égoutter les *mélasses*, et l'on détache le pain de sucre.

Devis du matériel d'une distillerie travaillant par jour 10 000 *kilog. de mélasse de sucrerie de betteraves*, d'après M. Savalle.

1° *Force motrice :* Deux générateurs de 35 chevaux chacun.		
Tôles, 17 400 kilog. à 65 fr.	11 310 fr.	15 350 fr.
Fontes, 8600 kilog. à 40 fr.	3 440	
Accessoires, environ	600	
2° *Moteurs :* Une machine à vapeur de 6 chevaux pour les pompes et une de 6 chevaux pour le four à potasse		5 500
3° *Distillation :* Une colonne en cuivre n° 7		15 000
Support, pied de colonne à chauffage tubulaire		3 500
4° *Rectification des alcools :* Un rectificateur n° 5 à chaudière en tôle.		14 500
5° *Pompes :* Une pompe à jus fermenté en bronze		5 000
Deux pompes à eau froide		
Deux pompes alimentaires		
6° *Fermentation :* Douze cuves en bois de 160 hectolitres chacune		4 000
7° *Réservoirs en tôle :* Environ 10 000 kilog., à 65 fr. les 100 kilog		6 500
8° *Tuyauterie, robinetterie* et montages divers, environ		6 500
9° *Four Porion :* Carneau d'évaporation. Fours et cheminée		6 000
Total approximatif		81 850 fr.

598. Fabrication de la bière. La bière est le produit de la transformation de la matière amylacée de l'orge en glucose, et de la fermentation du moût sucré obtenu.

L'*orge*, gonflée par humectation dans l'eau, est placée dans un cellier (*germoir*) en couches de $0^m,50$ d'épaisseur. Par suite de la germination, il se forme de la *diastase*, substance azotée amorphe, qui peut transformer l'amidon en dextrine et en glucose.

Quand la gemmule est longue comme les 2/3 du grain, on retire l'orge du germoir; et après l'avoir fait sécher à l'air libre, puis dans une étuve où la température s'élève graduellement jusqu'à 80°, on concasse les grains entre des meules. Ce produit est le *malt*.

Le malt est alors soumis au *brassage* ou *saccharification*. On l'étend sur le fond percé d'une grande cuve à double fond. Dans l'intervalle qui sépare les deux fonds, on introduit de l'eau chauffée à 75°, on brasse la matière, puis on ferme la cuve et on laisse reposer le tout durant trois heures. La diastase agit sur l'amidon et le transforme en glucose qui se dissout dans l'eau. Le liquide est alors appelé *moût*.

On soutire le moût et on le transporte dans des chaudières où on le fait bouillir avec du houblon (dans la proportion de 2 kilog. pour 100 litres de bière).

Le moût houblonné est ensuite refroidi, puis versé dans de grandes cuves *guilloires* en bois de chêne, où la *fermentation* est déterminée par de la levure de bière (2 kilog. pour 1000 litres de bière). On soutire alors la bière et on achève sa fermentation dans des fûts. La mousse est recueillie à part, et la levure qu'on en exprime sert pour diverses opérations, entre autres pour la panification. La fermentation dure trente heures pour la bière blanche (pale ale), trois jours pour la bière brune simple, et dix à douze jours pour les bières fortes.

ÉVAPORATION

599. Évaporation spontanée à l'air libre. Cette évaporation, qu'on n'emploie guère que dans l'extraction du sel marin, est d'autant plus active : 1° que la surface des liquides est plus grande; 2° que la température du liquide à évaporer et de l'air environnant ou de l'un de ces deux corps seulement est plus grande; 3° que l'air est plus sec et plus rapidement renouvelé.

D'après Payen, dans les marais salants, en faisant usage de ce mode d'évaporation, l'extraction de 1000 kilog. de sel coûte de 6 à 25 francs, suivant les localités et l'état de l'atmosphère. En évaporant l'eau à l'aide de la houille, comme l'eau de mer contient à peu près 0,025 de sel marin, pour obtenir 1000 kilog. de sel, il faudrait évaporer $\frac{1000}{0,025} \times 0,975 = 39000$ kilog. d'eau, qui exigeraient $\frac{39000}{6} = 6500$ kilog. de houille. Supposant que l'hectolitre de houille de 80 kilog. coûte $2^f,40$, le combustible brûlé pour obtenir 1000 kilog. de sel revient à 195 francs.

600. Évaporation par courant d'air forcé. Ce genre d'évaporation ne s'emploie guère que pour la concentration des jus de fruits. Montgolfier en a fait usage le premier, pour concentrer des marcs de raisin avant leur fermentation, tout en leur conservant leurs principes fermentescibles. En automne, 1^{m^3} d'air dissout moyennement 3 grammes d'eau. Un homme, en six heures, pouvant, à l'aide d'une machine, imprimer une vitesse de 5 mètres par seconde à environ 70000^{m^3} d'air, la quantité d'eau qu'il évaporera en un jour sera de $70000 \times 0{,}003 = 210$ kilog. En diminuant de moitié la vitesse imprimée à l'air, on pourrait quadrupler la quantité d'air mise en mouvement, et par là diminuer considérablement le prix de revient de ce mode d'évaporation.

601. Évaporation à l'air libre à l'aide d'un foyer. Quelle que soit la température à laquelle un liquide se vaporise, on admet que la quantité de chaleur absorbée par sa vaporisation est la même qu'à sa température d'ébullition; mais, d'après Péclet, la quantité de chaleur absorbée augmente rapidement à mesure que la température diminue, et cela, à cause de l'échauffement de l'air qui dissout la vapeur et du rayonnement. Appelant :

H la force élastique de la vapeur en mètres de mercure, d'où il résulte que la force élastique de l'air est $0^m{,}76 - H$;
q le poids de vapeur contenu dans un mètre cube d'air saturé;
q' le poids de l'air seulement; le poids de la vapeur et de l'air est $q'' = q + q'$;
t la température de l'air saturé;
C le nombre d'unités de chaleur contenu dans le poids q de vapeur;
c le nombre d'unités de chaleur contenu dans le poids q' d'air,

on a :

$$q = \frac{0{,}622 \times 1{,}293187H}{0{,}76\,(1 + 0{,}00367t)} \quad (494,\ 501), \qquad q' = \frac{1{,}293187\,(0{,}76 - H)}{0{,}76\,(1 + 0{,}00367t)} \quad (483)$$

$$C = q\,(606{,}5 + 0{,}305t) \quad (490) \qquad c = q' \times 0{,}2377t \quad (488).$$

Nous donnons dans les colonnes 4, 5, 7 et 8 du tableau suivant les valeurs fournies par ces formules. Pour calculer c, nous avons constamment pris 0,2377 pour la capacité calorifique de l'air; c'est la moyenne des trois valeurs trouvées par Regnault (488).

Pour la même température, la tension H et le poids q de la vapeur contenue dans 1 mètre cube d'air ont les valeurs consignées dans les colonnes 3 et 5 de la table, page 646.

Comparant l'expression précédente de la valeur de q' à celle donnée page 644 pour le poids Q de 1 mètre cube d'air sec à la même température t, mais à la pression H, on obtient, comme cela devait être d'après le n° 483 :

$$q' = Q\,\frac{0{,}76 - H}{H}.$$

Ainsi les poids q' de la 5e colonne du tableau suivant s'obtiennent simplement en multipliant les poids Q de la dernière colonne de la table, page 646, par $\frac{0{,}76 - H}{H}$.

Le poids de 1 mètre cube d'air saturé est évidemment :

$$q'' = q + q',$$

somme des nombres des colonnes 4 et 5 (voir page 780).

602. *Tableau des poids de vapeur et d'air contenus dans 1 mètre cube d'air saturé à différentes températures sous la pression atmosphérique 0m,76; du poids de ce mètre cube d'air saturé; de la chaleur contenue dans 1 mètre cube d'air saturé; du poids d'air pour dissoudre 1 kilog. de vapeur, et du poids de 1 mètre cube d'air sec.*

TEMPÉRATURE t.	TENSION de la vapeur H	TENSION de l'air 0,76 — H	POIDS de la vapeur q	POIDS de l'air q'	POIDS total q''=q+q'	CHALEUR de la vapeur C	CHALEUR de l'air c	CHALEUR totale C+c	POIDS d'air pour 1 kil de vapeur Q_1	POIDS de 1 m. cub. d'air sec Q_2
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	mèt.	mèt.	kilog.	kilog.	kilog.	unités	unités	unités	kilog.	kilog.
0°	0,0046	0,7554	0,0049	1,2854	1,2903	2,9528	0,0000	2,9528	264,02	1,2932
1	0,0049	0,7551	0,0052	1,2801	1,2853	3,1610	0,3043	3,4653	245,73	1,2885
2	0,0053	0,7547	0,0056	1,2748	1,2804	3,3820	0,6061	3,9881	228,85	1,2838
3	0,0057	0,7543	0,0060	1,2695	1,2755	3,6162	0,9053	4,5215	213,24	1,2791
4	0,0061	0,7539	0,0064	1,2654	1,2718	3,8648	1,2032	5,0680	198,98	1,2745
5	0,0065	0,7535	0,0068	1,2589	1,2657	4,1290	1,4963	5,6253	185,39	1,2699
6	0,0070	0,7530	0,0072	1,2537	1,2609	4,4085	1,7880	6,1965	173,00	1,2653
7	0,0075	0,7525	0,0077	1,2486	1,2563	4,7063	2,0776	6,7839	161,48	1,2611
8	0,0080	0,7520	0,0082	1,2431	1,2513	5,0195	2,3638	7,3833	150,80	1,2563
9	0,0086	0,7514	0,0088	1,2377	1,2465	5,3518	2,6488	8,0006	140,90	1,2518
10	0,0092	0,7508	0,0094	1,2324	1,2418	5,7033	2,9293	8,6326	131,71	1,2474
11	0,0098	0,7502	0,0100	1,2270	1,2370	6,0750	3,2082	9,2832	123,17	1,2430
12	0,0105	0,7495	0,0106	1,2216	1,2322	6,4680	3,4845	9,9525	115,24	1,2386
13	0,0112	0,7488	0,0113	1,2162	1,2275	6,8833	3,7581	10,6414	107,86	1,2343
14	0,0119	0,7481	0,0120	1,2107	1,2227	7,3214	4,0290	11,3504	101,001	1,2300
15	0,0127	0,7473	0,0127	1,2052	1,2179	7,7845	4,2973	12,0818	94,610	1,2257
16	0,0135	0,7465	0,0135	1,1997	1,2132	8,2729	4,5627	12,8356	88,660	1,2215
17	0,0144	0,7456	0,0144	1,1941	1,2085	8,7898	4,8254	13,6152	83,120	1,2172
18	0,0154	0,7446	0,0152	1,1885	1,2037	9,3306	5,0853	14,4159	77,956	1,2131
19	0,0163	0,7437	0,0162	1,1829	1,1991	9,9023	5,3423	15,2446	73,142	1,2089
20	0,0174	0,7426	0,0171	1,1772	1,1943	10,5046	5,5964	16,1010	68,651	1,2047
21	0,0185	0,7415	0,0182	1,1725	1,1907	11,149	5,8529	17,002	64,457	1,2018
22	0,0197	0,7403	0,0193	1,1656	1,1849	11,806	6,0955	17,902	60,545	1,1966
23	0,0209	0,7391	0,0204	1,1598	1,1802	12,507	6,3405	18,848	56,888	1,1925
24	0,0222	0,7378	0,0216	1,1538	1,1754	13,245	6,5823	19,827	53,471	1,1885
25	0,0236	0,7364	0,0228	1,1478	1,1706	14,020	6,8208	20,841	50,276	1,1845
26	0,0250	0,7350	0,0241	1,1417	1,1658	14,834	7,0561	21,890	47,290	1,1805
27	0,0265	0,7335	0,0255	1,1356	1,1611	15,690	7,2879	22,978	44,492	1,1766
28	0,0281	0,7319	0,0270	1,1293	1,1563	16,587	7,5163	24,103	41,873	1,1727
29	0,0298	0,7302	0,0285	1,1230	1,1515	17,530	7,7411	25,271	39,419	1,1688
30	0,0315	0,7285	0,0301	1,1166	1,1467	18,517	7,9623	26,479	37,123	1,1649
31	0,0334	0,7266	0,0317	1,1101	1,1418	19,553	8,1797	27,733	34,968	1,1611
32	0,0354	0,7246	0,0335	1,1034	1,1369	20,638	8,3932	29,031	32,948	1,1573
33	0,0374	0,7226	0,0353	1,0967	1,1320	21,775	8,6027	30,378	31,053	1,1535
34	0,0396	0,7204	0,0372	1,0899	1,1271	22,965	8,8081	31,773	29,275	1,1497
35	0,0418	0,7182	0,0393	1,0829	1,1222	24,246	9,0093	33,255	27,565	1,1460
36	0,0442	0,7158	0,0413	1,0758	1,1171	25,515	9,2061	34,721	26,036	1,1423
37	0,0467	0,7133	0,0435	1,0686	1,1121	26,879	9,3985	36,278	24,561	1,1386
38	0,0493	0,7107	0,0458	1,0613	1,1071	28,304	9,5862	37,890	23,176	1,1349
39	0,0520	0,7080	0,0482	1,0538	1,1020	29,795	9,7691	39,564	21,872	1,1313
40	0,0549	0,7051	0,0507	1,0462	1,0969	31,351	9,9471	41,298	20,646	1,1276
41	0,0579	0,7021	0,0533	1,0384	1,0917	32,977	10,1199	43,097	19,492	1,1241
42	0,0611	0,6989	0,0560	1,0305	1,0865	34,674	10,2875	44,962	18,405	1,1205
43	0,0643	0,6957	0,0588	1,0224	1,0812	36,446	10,4497	46,896	17,381	1,1169
44	0,0678	0,6922	0,0618	1,0141	1,0759	38,294	10,6061	48,900	16,417	1,1134

TEMPÉRATURE *t*.	TENSION		POIDS			CHALEUR			POIDS d'air pour 1 kil. de vapeur Q_1	POIDS de 1 m. cub. d'air sec Q_2
	de la vapeur H	de l'air 0,76 — H	de la vapeur *q*	de l'air *q'*	total $q''=q+q'$	de la vapeur C	de l'air *c*	totale C + *c*		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	mèt.	mèt.	kilog.	kilog.	kilog.	unités	unités	unités	kilog.	kilog.
45°	0,0714	0,6886	0,0648	1,0056	1,0704	40,221	10,7577	50,979	15,507	1,1099
46	0,0752	0,6848	0,0681	0,9970	1,0651	42,231	10,901	53,132	14,649	1,1064
47	0,0791	0,6809	0,0714	0,9882	1,0596	44,324	11,040	55,364	13,841	1,1029
48	0,0832	0,6768	0,0749	0,9791	1,0540	46,506	11,172	57,678	13,077	1,0995
49	0,0875	0,6725	0,0785	0,9699	1,0484	48,778	11,297	60,075	12,357	1,0961
50	0,0920	0,6680	0,0823	0,9604	1,0427	51,143	11,415	62,558	11,676	1,0927
51	0,0967	0,6633	0,0862	0,9507	1,0369	53,605	11,526	65,131	11,033	1,0893
52	0,1015	0,6585	0,0902	0,9409	1,0311	56,166	11,629	67,795	10,425	1,0859
53	0,1066	0,6534	0,0945	0,9307	1,0252	58,831	11,725	70,556	9,8505	1,0826
54	0,1119	0,6481	0,0989	0,9203	1,0192	61,601	11,813	73,414	9,3071	1,0793
55	0,1175	0,6425	0,1034	0,9097	1,0131	64,480	11,893	76,373	8,7931	1,0760
56	0,1232	0,6368	0,1082	0,8988	1,0070	67,472	11,964	79,436	8,3065	1,0727
57	0,1293	0,6307	0,1131	0,8876	1,0007	70,580	12,026	82,606	7,8457	1,0695
58	0,1355	0,6245	0,1183	0,8761	0,9944	73,807	12,079	85,886	7,4094	1,0662
59	0,1420	0,6180	0,1235	0,8644	0,9879	77,157	12,122	89,279	6,9961	1,0630
60	0,1488	0,6112	0,1291	0,8524	0,9815	80,642	12,157	92,799	6,6042	1,0599
61	0,1558	0,6042	0,1348	0,8400	0,9748	84,243	12,179	96,422	6,2328	1,0566
62	0,1632	0,5968	0,1407	0,8273	0,9680	87,985	12,192	100,177	5,8806	1,0535
63	0,1708	0,5892	0,1468	0,8143	0,9611	91,864	12,194	104,058	5,5464	1,0503
64	0,1787	0,5813	0,1532	0,8010	0,9541	95,887	12,185	108,072	5,2293	1,0472
65	0,1869	0,5731	0,1597	0,7873	0,9470	100,055	12,164	112,219	4,9282	1,0441
66	0,1955	0,5645	0,1666	0,7732	0,9398	104,373	12,131	116,504	4,6424	1,0410
67	0,2044	0,5556	0,1736	0,7588	0,9325	108,84	12,085	120,93	4,3708	1,0380
68	0,2136	0,5464	0,1809	0,7441	0,9250	113,48	12,027	125,51	4,1127	1,0349
69	0,2232	0,5368	0,1885	0,7289	0,9174	118,27	11,955	130,23	3,8674	1,0319
70	0,2331	0,5269	0,1963	0,7133	0,9096	123,23	11,869	135,10	3,6342	1,0289
71	0,2434	0,5166	0,2044	0,6973	0,9017	128,37	11,769	140,14	3,4124	1,0259
72	0,2541	0,5059	0,2127	0,6809	0,8936	133,67	11,654	145,32	3,2014	1,0229
73	0,2651	0,4949	0,2213	0,6641	0,8854	139,16	11,524	150,68	3,0005	1,0199
74	0,2766	0,4834	0,2302	0,6468	0,8771	144,84	11,378	156,22	2,8093	1,0170
75	0,2885	0,4715	0,2395	0,6291	0,8686	150,70	11,215	161,92	2,6273	1,0141
76	0,3008	0,4592	0,2490	0,6109	0,8599	156,76	11,036	167,80	2,45[illegible]8	1,0112
77	0,3136	0,4464	0,2588	0,5922	0,8510	163,03	10,839	173,87	2,2885	1,0083
78	0,3268	0,4332	0,2689	0,5731	0,8420	169,49	10,6248	180,11	2,1310	1,0054
79	0,3405	0,4195	0,2794	0,5534	0,8328	176,17	10,3916	186,56	1,9809	1,0025
80	0,3546	0,4054	0,2901	0,5332	0,8233	183,06	10,1392	193,20	1,8376	0,9997
81	0,3693	0,3907	0,3013	0,5125	0,8138	190,17	9,8671	200,04	1,7010	0,9968
82	0,3844	0,3756	0,3128	0,4912	0,8040	197,96	9,5746	207,53	1,5706	0,9940
83	0,4001	0,3599	0,3246	0,4694	0,7940	205,08	9,2609	214,34	1,4462	0,9912
84	0,4163	0,3437	0,3368	0,4470	0,7838	212,88	8,9256	221,81	1,3274	0,9885
85	0,4330	0,3270	0,3493	0,4241	0,7734	220,93	8,5678	229,50	1,2139	0,9857
86	0,4503	0,3097	0,3623	0,4005	0,7628	229,23	8,1870	237,42	1,1055	0,9829
87	0,4682	0,2918	0,3756	0,3763	0,7519	237,78	7,7823	245,56	1,0019	0,9802
88	0,4867	0,2733	0,3894	0,3515	0,7409	246,59	7,3531	253,94	0,9029	0,9775
89	0,5058	0,2542	0,4035	0,3261	0,7296	255,67	6,8986	262,57	0,8082	0,9748
90	0,5255	0,2345	0,4180	0,3000	0,7180	265,02	6,4181	271,44	0,7176	0,9721
91	0,5458	0,2142	0,4330	0,2733	0,7063	274,65	5,9107	280,56	0,6310	0,9694
92	0,5668	0,1[illegible]32	0,4484	0,2458	0,6942	284,56	5,3756	289,94	0,5482	0,9668
93	0,5884	0,1716	0,4643	0,2177	0,6820	294,76	4,8121	299,57	0,4688	0,9641
94	0,6107	0,1493	0,4806	0,1888	0,6694	305,26	4,2195	309,48	0,3929	0,9615
95	0,6338	0,1262	0,4974	0,1592	0,6566	316,06	3,5961	319,66	0,3202	0,9589
96	0,6575	0,1025	0,5146	0,1289	0,6435	327,18	2,9420	330,12	0,2505	0,9563
97	0,6820	0,0780	0,5323	0,0978	0,6302	338,61	2,2559	340,87	0,1838	0,9537
98	0,7073	0,0527	0,5505	0,0660	0,6165	350,37	1,5369	351,91	0,1198	0,9511
99	0,7333	0,0267	0,5693	0,0333	0,6026	362,45	0,7151	363,17	0,0585	0,9485
100	0,7600	0,0000	0,5884	0,0000	0,5884	374,82	0,0000	374,82	0,0000	0,9460

Le poids q' d'air dissolvant un poids q de vapeur, pour dissoudre 1 kilog. de vapeur il faut un poids d'air :

$$Q_1 = q' \frac{1}{q} = \frac{q'}{q} \cdot$$

Ainsi les nombres de la 5e colonne du tableau précédent, divisés par ceux de la 4e, donnent ceux de la 10e.

Le poids de 1 mètre cube d'air sec sous la pression $0^m,76$ et à la température t est (483) :

$$Q_2 = 1,293187 \frac{1}{1+0,00367t} = \frac{1,293187}{1+0,00367t}$$

En admettant que la vapeur ne se dégage dans l'air que quand celui-ci s'en est saturé à la température du liquide ou de la vapeur, on déterminera facilement, au moyen du tableau page 778, les quantités de chaleur absorbées par la vaporisation d'un kilogramme d'eau à différentes températures, y compris l'échauffement de l'air. Ainsi, en supposant l'eau et l'air sec à 0°, si l'on évapore à 40°, un kilogramme d'eau absorbera :

Pour la vapeur : $31,351 \frac{1}{0,0507} = \frac{31,351}{0,0507} = 618$;

pour l'air : $0,9471 \frac{20,646}{1,0462} = 196$.

Total 618 + 196 = 814 unités de chaleur.

603. *Tableau de la quantité totale de chaleur moyenne absorbée par l'évaporation de 1 kilog. d'eau à différentes températures, y compris le rayonnement et l'échauffement de l'air, d'après Péclet.* La température de l'air extérieur étant de 15°.

TEMPÉRATURE DE L'EAU.	CHALEUR ABSORBÉE.	TEMPÉRATURE DE L'EAU.	CHALEUR ABSORBÉE.
	unités		unités
de 58°,25 à 55°,25	724	de 44°,75 à 40°,75	949
de 55 ,25 à 52	780	de 40 ,75 à 36 ,25	1063
de 52 à 48 ,50	837	de 36 ,25 à 31 ,25	1176
de 48 ,50 à 44 ,75	893		

Traçant une courbe ayant pour abscisses les températures moyennes du tableau précédent, et pour ordonnées les quantités correspondantes de chaleur absorbées, de cette courbe, convenablement prolongée au delà des limites des expériences, on conclut, pour une température extérieure de 15°, que les quantités totales de chaleur absorbées par l'évaporation d'un kilogramme d'eau sont approximativement, les températures de l'eau étant :

20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°,
1370	1160	1070	840	760	720	690	660.

Retranchant de ces nombres les quantités de chaleur absorbées par la vapeur et l'échauffement de l'air, que l'on peut calculer comme il a été indiqué ci-dessus, on aurait les pertes de chaleur dues au rayonnement.

604. *Tableau des poids de vapeur formés en une heure par mètre carré de surface d'eau à différentes températures, dans un air calme.*

TEMPÉRATURE.	POIDS D'EAU VAPORISÉE.	TEMPÉRATURE.	POIDS D'EAU VAPORISÉE.
	kil.		kil.
20°	0,32	60°	2,71
30	0,57	70	4,32
40	1,00	80	6,64
50	1,70	90	10,00

Dans les chaudières rectangulaires qui étaient employées aux salines de Dieuze, et qui avaient 25 mètres de long, 5 mètres de large et $0^m,004$ d'épaisseur de tôle, suivant que le liquide était en ébullition ou non, la houille brûlée pour obtenir 100 kilog. de sel était de 36 à 38 kilog. ou de 42 à 44 kilog. Les surfaces de grille et de chauffe étaient à peu près le double de ce qu'elles seraient dans une chaudière à vapeur ordinaire pour une même consommation de combustible (742). La cheminée avait 18 mètres de hauteur sur un mètre de côté en bas, et $0^m,60$ en haut; elle était commune à quatre foyers qui consommaient chacun 52 kilog. de houille à l'heure, $0^{kg},46$ par décim. carré de grille; la température de la fumée y était à 100°. Chaque kilog. de houille vaporisait $7^{kg},50$ d'eau.

605. Évaporation des liquides chauffés par la vapeur. D'après Clément Desormes, 1 mètre carré de cuivre mince, exposé d'un côté à la vapeur à 100°, et en contact par l'autre face avec de l'eau à une température moyenne de 28°, condense $1^{kg},40$ de vapeur par heure et par chaque degré de la différence 72° des températures. L'appareil était à double fond et on n'a pas pris les précautions nécessaires pour expulser l'air de ce double fond, le liquide n'a pas été porté à l'ébullition, circonstances qui diminuent beaucoup la transmission de la chaleur.

De diverses expériences faites sur des chaudières chauffées à la vapeur et employées à la concentration du jus de betterave, il résulte : 1° que dans les *appareils à double fond muni à la partie supérieure d'un robinet pour l'expulsion de l'air*, on peut admettre, en supposant que la chaleur latente de la vapeur d'eau est de 550 et que par suite chaque kilogramme de vapeur condensé émet 550 unités de chaleur (490), que la condensation de vapeur est de $2^k,95$ par mètre carré, par heure et par degré de différence de température, pendant qu'on porte le liquide à l'ébullition; dès que le liquide est en ébullition, on n'a rien de positif relativement à la quantité de vapeur condensée; 2° que dans les *appareils à serpentin*, on peut admettre au moins le chiffre de $2^{kg},95$ pendant la chauffe, et au moins celui de 8 à 9 kilog. pendant l'ébullition, à la condition que

chaque serpentin de $0^m,025$ à $0^m,030$ de diamètre intérieur n'aura pas plus de 30 à 40 mètres de longueur.

La grande différence des poids $2^{kg},95$ et 9 kilog. est due sans doute à ce que le liquide qui mouille les tubes se renouvelle plus rapidement pendant l'ébullition qu'avant. C'est probablement aussi à la même cause qu'on doit attribuer une légère baisse du chiffre $2^{kg},95$ de vapeur condensée vers les basses températures du liquide, et au contraire une légère hausse vers les températures qui approchent de l'ébullition; résultats que semblent constater quelques expériences.

Pendant la chauffe, la quantité de vapeur condensée par mètre carré ayant été trouvée sensiblement la même pour les chaudières à double fond que pour celles à tuyaux, il est probable qu'il en serait de même pendant l'ébullition, en prenant toutefois les précautions nécessaires pour l'expulsion complète de l'air que la vapeur en se condensant laisse dans le double fond.

Exemple. Soit à concentrer en une heure 5000 kilog. de *clairce*, c'est-à-dire de sirop avant la cuisson. Ce sirop, composé de 30 parties d'eau pour 60 de sucre, pour être amené à 47° de l'aréomètre, degré ordinaire de concentration, perd à peu près 15 p. 100 d'eau; ce qui fait 750 kilog. pour 5000 kilog. de sirop. La température d'ébullition de la claircе étant 110° et sa chaleur spécifique moitié de celle de l'eau, la quantité de chaleur nécessaire pour en élever 5000 kilog. de 20° à 110° est $\frac{5000 \times 90}{2} = 225000$ unités; ce qui correspond à la chaleur dégagée par la condensation de $\frac{225000}{550} = 409$ kilog. de vapeur d'eau. La quantité totale de vapeur à fournir pour élever la température de la claircе de 20° à 110°, et lui faire perdre 15 p. 100 d'eau, est donc :

$$750 + 409 = 1159 \text{ kilog.}$$

Supposons maintenant que la vapeur soit à la température de $141°,68$, ce qui correspond à 3,75 atmosphères de pression (494). Pendant que la claircе s'échauffe, l'excès moyen de la température de la vapeur sur celle de la claircе est :

$$141,68 - \frac{110 + 20}{2} = 76°,68.$$

Pendant l'ébullition, la différence entre la température de la vapeur qui se condense et celle du liquide qui se vaporise est à peu près de 27°.

Appelant alors t la durée de la chauffe, t' celle de l'ébullition, et x la surface de serpentin, on a :

$$t = \frac{409}{2,95 \times 76,78 \times x} \quad \text{et} \quad t' = \frac{750}{8 \times 27 \times x}.$$

Mais $t + t' = 1$; donc :

$$\frac{409}{2,95 \times 76,68 \times x} + \frac{750}{8 \times 27 \times x} = 1, \quad \text{d'où} \quad x = 5^{mq},27.$$

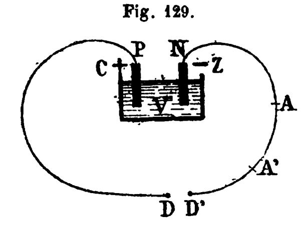
La surface d'un serpentin de 0^{m},03 de diamètre intérieur et de 30 mètres de longueur étant de 2^{mq},83, deux tels serpentins suffisent pour l'exemple qui nous occupe.

ÉLECTRICITÉ, TÉLÉPHONIE, ÉCLAIRAGE ÉLECTRIQUE, ETC. (1)

606. L'électricité comprend deux sortes de phénomènes : les premiers sont produits par l'électricité en repos et à l'état de tension à la surface des corps (*électricité statique*); les seconds embrassent l'action de l'électricité en mouvement (*électricité dynamique*).

607. Courant électrique (*fig.* 129). Si l'on plonge une lame de zinc Z dans de l'eau étendue d'acide sulfurique, on constate que le zinc est attaqué par l'acide; si, d'autre part, on plonge dans le même liquide, à côté du zinc, une lame C d'un métal, non attaqué par l'acide étendu, du cuivre, par exemple, et qu'on réunisse extérieurement les lames de zinc et de cuivre par un fil de cuivre, on forme un *circuit* complet, parcouru par un *courant* électrique. On a ainsi construit une *pile* électrique.

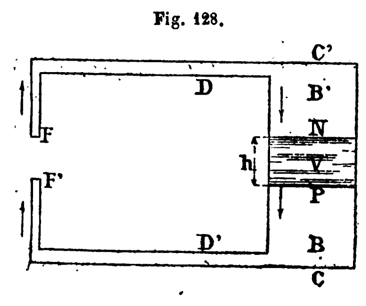
Fig. 129.



Pour le prouver, il suffit de placer une aiguille aimantée au-dessus ou au-dessous du fil *conducteur*, qui réunit les deux lames ou *pôles* de la pile, on voit cette aiguille dévier de sa position d'équilibre et tendre à se mettre en croix avec le fil. Si, au lieu de placer le fil au-dessus ou au-dessous de l'aiguille, on l'enroule un grand nombre de fois sur un cadre, les spires étant isolées les unes des autres, au moyen d'un fil de soie, on multiplie ainsi l'action du courant sur l'aiguille, et par cette disposition on peut constater la présence d'un courant même très faible. On a ainsi construit un *galvanomètre*, si l'aiguille peut se mouvoir sur un cercle gradué, qui sert à mesurer ses déviations.

On peut comparer un courant électrique à un fluide qui s'écoule, et cette comparaison très élémentaire, mais non absolue, permet d'expliquer la marche d'un courant. Nous la résumons, d'après M. de Lartige (*Cosmos*, 1885).

Fig. 128.



Considérons un cylindre CC′ (*fig.* 128), dans lequel se meut un piston P, d'épaisseur infiniment petite et de poids négligeable; au-dessus se trouve un volume V d'un liquide pesant, occupant une hauteur *h*. Des parties inférieures et supérieures du cylindre partent deux tubes D, D′, fermés à leurs extrémités F, F′; supposons que tout

(1) Ce chapitre a été rédigé en grande partie par M. Paul Barré. Il résume les données les plus récentes.

l'espace non occupé par le liquide pesant V soit rempli d'un fluide incompressible et de poids nul. Ce système est assimilable à une pile avec deux conducteurs DF, D'F', partant des pôles P et N, et non réunis entre eux; dans ces conditions, la pile ne fonctionne pas, mais aussitôt que les deux pôles sont réunis par un conducteur, le courant s'établit.

L'*intensité* du courant (quantité de fluide qui passe par seconde) est proportionnelle à la *force électromotrice* de la pile (différence des pressions sur les deux faces P et N du liquide V) et inversement proportionnelle à la somme des résistances qui se compose de la résistance du fil (*grosseur des tuyaux* DF, D'F') et de la *résistance intérieure* de la pile (*frottement du liquide* V *dans le cylindre*).

La pile cessera de marcher quand l'action chimique aura produit tout son effet, et par rapport à la figure 128, lorsque le piston P sera au bas de sa course.

608. Potentiel. Force électromotrice. Intensité. Résistance. Le *potentiel* est la pression électrique qui s'exerce en un point quelconque A d'un conducteur (*fig.* 129). Deux points quelconques, A et A' (*fig.* 129), ont une *différence de potentiel* qui est *nulle*, lorsque A et A' se confondent ou lorsqu'il ne se produit aucun courant entre ces deux points, et *maximum*, lorsque ces deux points sont aux pôles de la pile; ce maximum est la *force électromotrice*.

Le potentiel peut être défini comme la *température électrique*. Supposons que deux corps, d'inégale température, soient mis en présence (l'air remplaçant le fil métallique et servant, par conséquent, de conducteur), il y aura transport de calorique d'un des corps vers l'autre; par analogie, nous disons qu'il y a courant entre deux points d'un conducteur, lorsqu'ils n'ont pas la même température électrique, c'est-à-dire le même potentiel.

Le courant produit entre deux points d'un conducteur est donc dû à la différence de potentiel de ces deux points.

De même, dans notre système de fluide impondérable (*fig.* 128), le piston P, sous l'influence du poids du liquide V, tend à descendre, mais en est empêché par le fluide B incompressible, fluide qui ne peut s'écouler, puisque D'F' est fermé. Le fluide B supportera donc une pression proportionnelle à h; le fluide B' ne pouvant se dilater, subira lui aussi une pression inverse, mais inférieure à celle de B.

Réunissons les deux extrémités F et F', immédiatement le fluide B s'écoule dans le tuyau D', puis monte dans le tuyau D, poussé qu'il sera par la pression du liquide pesant V; il s'établira un courant dont l'intensité dépendra à la fois de la hauteur h, de la section des tuyaux, du coefficient de frottement du fluide sur les parois et de la résistance qu'éprouvent le piston P et le liquide qui le surmonte, à se déplacer dans le cylindre.

Considérons une pile (*fig.* 129) et coupons le conducteur en D, D'; nous aurons une analogie avec l'appareil qui précède. L'action chimique produit sur les lames métalliques P, N (*les surfaces supérieure et inférieure* P, N, *du liquide* V, *fig.* 128) une tension électrique (*pression*)

qui dépend de la nature de l'action chimique (*action qui remplace ici la hauteur* h *du liquide pesant* V *de la* figure 128). Cette tension se transmet à travers les conducteurs, en perdant de sa valeur, au fur et à mesure que ces conducteurs s'allongent et que, par suite, la résistance du fil augmente. Si l'on réunit les deux conducteurs, le courant ou l'écoulement du fluide électrique se produira; dans la pratique, on le suppose allant du cuivre C, qui est appelé *pôle positif*, au zinc Z, qui est appelé *pôle négatif*.

La force électromotrice varie avec la nature de l'action chimique.

609. Loi de Ohm. *L'intensité d'un courant électrique est proportionnelle à la force électromotrice* E *et inversement proportionnelle à la résistance* R, c'est-à-dire qu'on a :

$$I = \frac{E}{R}, \qquad (1)$$

d'où l'on déduit successivement :

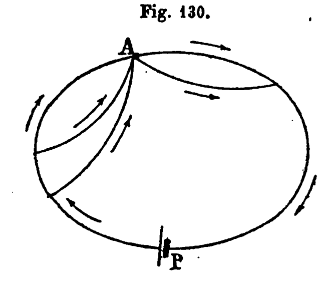
$$E = I \times R \quad \text{et} \quad R = \frac{E}{I}. \qquad (2)$$

La résistance opposée au courant comprend : la résistance r de la source, et la résistance R du conducteur; la formule (1) devient donc :

$$I = \frac{E}{R + r}.$$

610. Lois de Kirchhoff. On est souvent obligé de faire une ou plusieurs dérivations sur un conducteur (*fig.* 130). Les lois de Kirchhoff y sont relatives; elles s'énoncent ainsi :

Fig. 130.



1° Lorsque plusieurs conducteurs partent d'un même point A, si l'on donne le signe + aux courants qui arrivent en ce point, et le signe — à ceux qui s'en éloignent (1), la somme des intensités des courants qui passent en ce point est nulle;

2° Dans tout circuit fermé, comprenant un système de conducteurs et de sources, la somme des produits des intensités par les résistances correspondantes est égale à la somme des forces électromotrices; ce qui est conforme à la relation (2).

611. Loi des courants dérivés. Lorsqu'un conducteur, reliant les deux pôles d'une source électrique A, se bifurque pour former deux circuits de résistance r et r', le courant d'intensité I se divise en deux courants d'intensités i et i', tels que :

$$I = i + i' \quad \text{et} \quad \frac{i}{i'} = \frac{r'}{r}.$$

(1) Le sens est facile à déterminer, puisque le courant est toujours supposé aller du pôle positif vers le pôle négatif.

612. Unités électriques. Le système de mesures absolues adopté est celui dans lequel on rapporte des longueurs au *centimètre*, les masses à la masse du *gramme* et les temps à la *seconde*. Il est connu sous le nom de système C. G. S. (ces lettres sont les initiales de centimètre, gramme, seconde). Mais les unités électriques exprimées dans ce système ne sont guère applicables dans la pratique, parce qu'elles conduisent à des nombres exprimés par un grand nombre de chiffres. On a donc fait choix d'*unités pratiques* qui sont des multiples ou des sous-multiples du système C. G. S. Ces unités ont été établies par le Congrès international des électriciens, tenu à Paris en 1881, et complétées au Congrès international des électriciens de Paris de 1889.

L'unité de tension, de *force électromotrice* (E) ou de différence de potentiel, a été appelée **volt**; l'étalon choisi est la force électromotrice d'un élément Daniell (622); on a $E = IR$ (loi de Ohm) (609).

L'unité de *résistance* (R) est l'**ohm**; c'est la résistance qu'offrent 100 mètres de fil télégraphique de 4 millimètres de diamètre, ou 48 mètres de fil de cuivre de 1 millimètre de diamètre; ou encore la résistance d'une colonne de mercure de 1 millimètre carré de section et de 106 mètres de longueur. La résistance R est l'inverse de la conductibilité électrique d'une substance donnée (615).

L'unité d'*intensité* (I) porte le nom d'**ampère**; c'est la quantité d'électricité qui traverse un circuit ayant une résistance de 1 ohm, sous l'influence d'une force électromotrice de 1 volt; on a, par définition (609) :

$$I = \frac{E}{R} = \frac{Q}{t}.$$

L'intensité est la même en tous les points du circuit intérieur et extérieur d'une pile ou d'une machine électrique d'une constitution donnée.

L'intensité est pour un courant ce qu'est un débit pour une conduite d'eau (c'est la quantité d'électricité qui passe par seconde).

L'unité de *quantité* (Q) d'électricité s'appelle **coulomb**; c'est le débit par seconde d'un courant dont l'intensité I est de 1 ampère; on a $Q = It$ (t exprimant le temps en secondes).

L'unité de *capacité* (C) (1) est le **farad**, c'est la capacité d'un conducteur qui, avec une force électromotrice de 1 volt, contient un coulomb; on a : $C = \frac{Q}{E}$. En pratique, on fait usage du *microfarad*, qui vaut un millionième de farad. La quantité d'électricité qui traverse un circuit pendant une heure porte le nom d'*ampère-heure* et vaut 3600 coulombs (l'heure = 3600 secondes).

(1) La *capacité* électrique est analogue à la capacité calorique ou chaleur spécifique des corps (487); c'est la quantité d'électricité nécessaire à un corps pour que son potentiel ou température électrique soit augmenté d'une unité.

613. Travail électrique. Le travail effectué par une quantité Q d'électricité transportée d'un point dont le potentiel est e à un autre point dont le potentiel est e' est donné par la formule :

$$T = Q(e - e') = QE,$$

E étant la différence des deux potentiels ou la force électromotrice.

Ce travail est le même que celui d'un poids Q descendant d'une hauteur représentée par E. L'unité de travail ou d'énergie électrique appelée E*rg* est le travail effectué par une force égale à une dyne (1) déplaçant le point d'application d'un centimètre. Ce travail a donc pour expression :

$$t = Q \times E = \frac{0^{gr},001}{9,81} \times 0^{m},01,$$

ce qui est analogue à la formule générale du travail :

$$\text{Travail} = \text{force} \times \text{espace} = \frac{P}{g} \times E,$$

or 1 kilog. = 1 000 000 de milligrammes;
1 mètre = 100 centimètres.

Le résultat précédent peut donc s'écrire :

$$t = \frac{1}{1\,000\,000 \times 100 \times 9,81} = \frac{1^{kgm}}{98\,100\,000} = \frac{1^{gr}}{9,81} \times 1^{cm}.$$

Ainsi l'unité de travail théorique par seconde ou l'*erg* est 98 100 000 fois plus petit que le kilogrammètre.

Pratiquement, on prend pour unité de travail le *joule* = 10 millions d'ergs.

Par des considérations que nous ne pouvons rapporter ici, Joule a donné la relation suivante du travail en fonction des quantités électriques définies ci-dessus :

$$T = EIt = RI^2t = RI \times It.$$

Mais comme : $E = RI$ et $Q = It$,

on en déduit : $T = QE$,

comme il a été déjà dit ci-dessus.

Le travail électrique est donc le produit de la quantité d'électricité par la force électromotrice. Son unité pratique est appelée *volt-coulomb* ou **joule**. 1 joule = $\frac{1}{9,81}$ kilogrammètre ou 10 millions d'ergs.

(1) La *dyne* est la force qui, agissant pendant une seconde sur un *gramme-masse*, lui imprime une accélération de vitesse de 1 centimètre par seconde. C'est à peu près la $\frac{1}{1000}$ partie d'un gramme, exactement le $\frac{1}{981}$.

Mais dans la pratique on a plutôt besoin de connaître la *puissance* d'une machine, c'est-à-dire son travail en une seconde. On sait que le *cheval-vapeur* = 75 kilogrammètres par seconde.

En divisant le travail électrique par le temps on obtient le travail en une seconde, qui sera mesuré par des $\frac{\text{volts-coulombs}}{\text{temps}}$ ou par des volts-ampères $\left(\text{puisque l'ampère} = \frac{\text{coulomb}}{\text{temps}}\right)$. Cette unité de puissance porte le nom de **watt**. 1 watt $= \frac{1}{9,81 \times 75} = \frac{1}{736}$ de cheval-vapeur.

Le watt est égal au joule par seconde.

Une machine de 1 cheval équivaut à une dynamo de 736 watts. L'équivalent mécanique d'une machine électrique se mesure donc en multipliant sa force électromotrice (mesurée en *volt-mètre*) par l'intensité du courant (*ampère-mètre*), et en divisant le produit par 736.

Les industriels ont été invités, par le Congrès de 1889, à exprimer en *kilowatts* la puissance de leur machine, au lieu de l'exprimer en chevaux-vapeur.

614. Tableau des multiples et sous-multiples des unités électriques.

Multiples :			*Sous-multiples :*		
Mega ou Meg, vaut. . .	1000000	unités.	Déci, vaut.	$\frac{1}{10}$	d'unité.
Myria.	10000	—	Centi.	$\frac{1}{100}$	
Kilo.	1000	—	Milli.	$\frac{1}{1000}$	—
Hecto.	100	—	Micro ou Micr.	$\frac{1}{1000000}$	—
Déca	10	—			

Ainsi, un microfarad = un millionième de farad,
un milli-ampère = un millième d'ampère,
un megohm = un million d'ohms.

Avant l'adoption universelle du système d'unités C. G. S., on se servait, en Angleterre, de l'*ohm B. A.* (Association Britannique), qui valait 0,9889 ohm C. G. S. En Allemagne, on employait l'*unité Siemens*, qui valait 0,946 ohm C. G. S.

615. Loi de la résistance (Pouillet). La résistance R d'un fil est proportionnelle à sa longueur l, elle est en raison inverse de sa section s, et proportionnelle aux coefficients spécifiques r de résistance; on a donc :

$$R\,(\text{en ohms}) = \frac{r \times l}{s}, \qquad (a)$$

l en *mètres* et s en *millimètres carrés*.

Comme exemple, supposons qu'on cherche la résistance opposée par un fil de fer de 2 kilomètres de longueur et de 5 millimètres de diamètre (section $= 19^{mm^2},635$). On trouvera dans la seconde colonne du tableau suivant la résistance spécifique du fer (0,09827); en faisant application de la formule (a), il vient :

$$R = \frac{0,09827 \times 2000^m}{19^{mm^2},635} = 10 \text{ ohms.}$$

Ces calculs ne sont pas rigoureux, car il faudrait tenir compte de la température, la résistance variant avec elle; on devrait aussi connaître le degré de pureté des corps, etc.

Tableau de la résistance des principaux métaux et de leur conductibilité électrique à 0°.

MÉTAUX.	SECTION : 1 MILLIM. CARRÉ. Longueur pour 1 ohm.	SECTION : 1 MILLIM. CARRÉ. Ohms par mètre de longueur (r) (coefficient spécifique de résistance).	OHMS par mètre de fil de 1 millim. de diamètre.	COEFFICIENT de conductibilité électrique à 0°.
	mètre	ohm	ohm	
Mercure liquide	1	0,9619	1,2247	1,61
Argent recuit	0,065	0,01521	0,01937	100,00
Cuivre recuit	0,060	0,01615	0,02057	92,00
Platine recuit	0,012	0,09158	0,1166	11,00
Or recuit	0,048	0,02081	0,2650	73,00
Aluminium recuit	0,034	0,024946	0,03751	100,00
Fer recuit	0,010	0,09827	0,1251	14,44
Plomb comprimé	0,005	0,1985	0,2526	7,70
Nickel recuit	0,008	0,1260	0,1604	13,11
Zinc comprimé	0,018	0,0569	0,07244	27,40
Etain comprimé	0,0075	0,1336	0,1701	11,45
Antimoine comprimé	0,0028	0,3590	0,4571	3,88
Bismuth comprimé	0,00075	1,3265	1,6890	»
Maillechort	»	0,2117	0,2695	7,90

Lorsqu'on veut des renseignements exacts, on doit s'adresser à l'expérimentation et faire usage de la méthode du *pont de Wheatstone*. On la trouvera décrite notamment dans le *Traité d'électricité industrielle* de MM. E. Cadiat et L. Dubost.

Les charbons sont meilleurs conducteurs lorsqu'ils ont été portés à une haute température.

Les métaux recuits sont meilleurs conducteurs que les métaux écrouis. La chaleur diminue leur conductibilité électrique de 0,00384 par degré centigrade, d'après Mathiessen.

L'augmentation de résistance à une température t s'obtient en multipliant le coefficient de conductibilité électrique à 0° (*dernière colonne du tableau précédent*) par le produit $0{,}00384 \times t$.

La résistance des métaux purs est plus petite que celle des alliages; c'est pourquoi le cuivre et le fer du commerce présentent plus de résistance que le cuivre et le fer *purs*. On doit donc rechercher, dans les conducteurs électriques, des métaux aussi purs que possible. La conductibilité du cuivre pur qui est 100, se trouve réduite à 60 dans certains alliages de ce métal.

Table de la résistance des fils de cuivre.

NUMÉROS des jauges.	DIAMÈTRE en millimètr.	SECTION en millimètr. carrés.	POIDS par mètre en grammes.	LONGUEUR en mètres par kilog. Cuivre nu.	RÉSISTANCES DU FIL PUR RECUIT A 0°. Ohms par mètre.	Mètres par ohm.	Ohms par kilog.
				Jauge décimale.			
	mm.	mm²	gr.	mèt.	ohm.	mèt.	ohm.
P	0,5	0,1963	1,74	576	0,081	12,305	46,81
1	0,6	0,2827	2,52	400	0,057	17,560	22,78
2	0,7	0,3848	2,83	294	0,042	23,900	12,30
3	0,8	0,5027	4,47	225	0,032	31,225	7,21
4	0,9	0,6362	5,66	178	0,025	39,515	4,19
5	1,0	0,7854	6.99	144	0,020	48,782	2,95
6	1,1	0,9503	8,47	119	0,017	59,024	2,02
7	1,2	1,131	10,06	100	0,014	70,247	1,42
8	1,3	1,327	11,84	85	0,012	82,420	1,03
9	1,4	1,540	13,70	73	0,0105	95,651	0,763
10	1,5	1,767	15,75	63	0,0091	109,75	0,574
11	1,6	2,011	17,89	56	0.0080	124,90	0,448
12	1,8	2,545	22,70	44	0,0063	158,08	0,278
13	2,0	3,142	27,95	36	0,0051	195,15	0,185
14	2,2	3,801	33.82	29	0,0042	236,08	0,123
15	2,4	4,524	40,23	25	0,0036	281,00	0,0880
16	2,7	5,726	51,00	19,80	0,0028	355,65	0,0557
17	3,0	7,069	62,93	16	0,0023	439,07	0,0365
18	3,4	9,079	80,80	12,50	0,0018	563,92	0,0222
19	3,9	11,946	106,35	9,50	0,00135	722,00	0,0128
20	4,4	15,205	135,28	7,40	0,00106	944,38	0,00784
				Jauge carcasse.			
12	0,47	0,1735	1,544	654	0,0809	12,335	52,91
14	0,44	0,1521	1,354	745	0,1062	9,418	79,20
16	0,40	0,1320	1,175	902	0,1224	8,173	110,44
18	0,37	0,1075	0,9568	1,053	0,1502	6,656	157,95
20	0,34	0,0909	0,8080	1,251	0,1779	5,622	222,55
22	0,30	0,0707	0,7181	1,607	0,2285	4,377	367,20
24	0,28	0,0616	0,5481	1,844	0,2478	4,036	456,94
26	0,26	0,0531	0,4814	2,140	0,3042	3,287	650,99
28	0,24	0,0452	0,4026	2,508	0,3570	2,801	895,36
30	0,20	0,0314	0,2797	3,614	0,5140	1,945	1857,6
32	0,16	0,0201	0,1790	5,590	0,8031	1,245	4489
34	0,12	0,0113	0,1007	9,929	1,4280	0,700	14179
36	0,10	0,00785	0,0699	14,369	2,056	0,486	29549
40	0,08	0,00503	0,0447	24,570	3,213	0,311	78943
48	0,06	0,00283	0,0252	39,824	5,713	0,173	227515
60	0,04	0,00156	0,0112	88,878	12,848	0,078	1 142405

(Extrait du *Manuel d'Électrométrie industrielle*, par R.-V. Picou.)

Résistance des liquides. Les corps non métalliques sont moins bons conducteurs que les métaux ; pour les dissolutions salines et acides, la résistance diminue avec la température, à l'inverse des métaux (p. 789). La résistance de l'eau est environ 44 millions de fois plus grande que celle du cuivre, mais l'addition d'un sel ou d'un acide rend l'eau meilleure conductrice. Une solution saturée de sulfate de cuivre n'offre plus qu'une résistance 12 millions de fois supérieure à celle du cuivre, et pour un mélange de 11 volumes d'acide sulfurique et de 89 volumes d'eau ce coefficient tombe à à 1100000. D'après Becquerel, voici le coefficient de conductibilité de quelques solu-

tions (à 20° environ) employées dans les applications électriques, le coefficient de l'argent étant pris égal à 100 000 000 :

Eau acidulée au 1/10 d'acide sulfurique	76,34
Acide azotique à 36 degrés	105,41
Solution saturée de sulfate de cuivre	7,25
Solution concentrée de chlorure de sodium	42,24
Solution saturée de sulfate de zinc	7,79

La résistance des corps solides non métalliques est très grande; celle du verre et de la porcelaine est presque infinie à la température ambiante, mais elle diminue beaucoup lorsque la température s'élève. La gutta-percha, la soie, sont également de très mauvais conducteurs. C'est ce qui fait employer ces divers corps pour isoler les fils métalliques traversés par des courants électriques.

616. Thermo-électricité : Loi de Joule. Toute énergie qui ne peut produire d'effet se transforme en chaleur et réciproquement. L'électricité n'échappe pas à la loi générale. Lorsqu'un courant d'intensité I traverse un circuit de résistance R, il l'échauffe, et si ce courant ne produit aucun travail, la quantité de chaleur (C), dégagée dans l'unité de temps par le passage du courant, est proportionnelle à la résistance du conducteur et au carré de l'intensité. Cette loi, donnée par Joule et vérifiée expérimentalement par M. Favre, conduit à la formule :

$$C = 0{,}2406\, I^2 R \text{ calories (gramme-degré).}$$

(Cette calorie est la quantité de chaleur nécessaire pour élever d'un degré centigrade un gramme d'eau.)

Mais comme $I = \frac{E}{R}$ (609), il vient :

$$C = \frac{0{,}2406\, E^2}{R} \text{ calories (gramme-degré),}$$

et

$$C = 0{,}2406\, IE \text{ calories (gramme-degré).}$$

617. Vitesse de l'électricité. D'après des expériences exécutées par MM. Fizeau et Gounelle sur les fils télégraphiques de Paris à Amiens et à Rouen, il résulte : 1° que dans un fil de fer de $0^m,0045$ de diamètre la vitesse de l'électricité est de 101 700 kilomètres par seconde; 2° que dans un fil de cuivre de $0^m,0025$ de diamètre, elle est de 177 700 kilomètres; 3° que les deux électricités positive et négative se propagent avec la même vitesse; 4° que la tension de l'électricité et l'intensité du courant sont sans influence sur la vitesse; 5° que dans des conducteurs de natures différentes les vitesses ne sont pas proportionnelles aux conductibilités électriques.

D'après les expériences les plus récentes, et notamment celle du professeur H. Hertz, de Carlsruhe, la vitesse de propagation de l'électricité a été trouvée égale à celle de la lumière, soit 300 000 kilomètres environ par seconde (666).

618. Propriétés des courants. Les *effets chimiques* se produisent toutes les fois qu'un courant traverse un corps composé *liquide* et conducteur; par exemple, si l'on plonge dans de l'eau (qui a été acidulée pour la rendre conductrice) deux fils de platine reliés aux deux pôles d'une pile, le courant, en traversant le liquide, le décompose en ses deux éléments : oxygène et hydrogène. On appelle *électrolyse* la décomposition d'un corps par l'électricité; le corps décomposé porte le nom

d'*électrolyte;* les deux points entre lesquels l'action électrolytique se produit sont appelés *électrodes;* dans le cas précédent, les électrodes sont les fils de platine. Dans les différents cas d'électrolysation, ***les éléments analogues à l'oxygène et aux acides se rendent ou se dégagent autour de l'électrode positive; les éléments analogues à l'hydrogène, aux métaux et aux bases se portent sur l'électrode négative*** (457).

Les *effets calorifiques* se produisent par le passage d'un courant dans un conducteur. L'échauffement varie suivant les circonstances, et peut, lorsque le fil métallique est très fin, porter ce fil au rouge et même le volatiliser.

Les *effets lumineux*, qui ne sont que l'exagération des précédents, ont reçu de nombreuses applications pour l'éclairage (657 à 661).

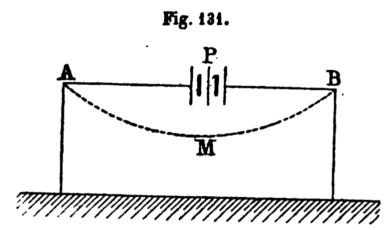
Les *effets mécaniques* se traduisent : 1° par l'action réciproque qu'exercent l'un sur l'autre deux circuits rendus mobiles au moyen d'une disposition particulière, et parcourus chacun par un courant; 2° par la propriété que possède un circuit enroulé autour d'une tige de fer doux, de lui communiquer le pouvoir attractif de l'aimant naturel (*électro-aimants*); 3° par l'analogie qui existe entre un circuit électrique en hélice, ou *solénoïde*, et un aimant naturel.

Les *effets physiologiques* sortent trop de notre cadre pour que nous nous y arrêtions.

Il y a encore les actions *à distance* que peut exercer un courant sur un circuit fermé, un courant sur un aimant, et enfin un aimant sur un circuit fermé. Ces phénomènes, devenus la base de nombreuses machines, sont classés sous le nom générique de phénomènes d'*induction* (636 et 642).

619. Remarque. Pour que le courant existe entre deux points A et B (*fig.* 131), il est nécessaire théoriquement que ces deux points soient reliés entre eux : 1° par un premier conducteur APB, comprenant la source d'électricité P; 2° par un second fil, dit de *retour*, AMB, qui ferme le circuit. Dans la pratique, ce dernier fil n'est pas indispensable, et l'on peut supprimer le fil de retour, à la condition que les points A et B soient reliés à la terre, qui dans ce cas joue le rôle de conducteur.

Fig. 131.



620. Sources d'électricité. 1° *Réactions chimiques.* Piles primaires ou hydro-électriques et accumulateurs.

2° *Actions calorifiques.* Piles thermo-électriques.

3° *Phénomènes de magnétisme et d'induction.* Machines magnéto-électriques et dynamo-électriques.

4° *Électricité produite par les frottements.* Machines électriques de Ramsden, de Nairne, de Van Marum, de Holtz, etc.

Les piles sont employées dans les services domestiques et les machines

dynamo-électriques dans les applications industrielles. Les autres systèmes sont peu ou point utilisés. Aussi n'en parlerons-nous pas.

620 bis. Piles primaires à un seul liquide. Toute action chimique produit de l'électricité. Nous avons déjà indiqué comment se produisait le courant dans la pile la plus simple (607). Les premières piles à un seul liquide de Volta, de Cruikshank, de Wollaston, de Muncke, etc., sont abandonnées aujourd'hui. Dans toutes, le courant est produit par l'action de l'acide sulfurique et du zinc sur l'eau. Elles ont l'inconvénient de ne pas produire de courant constant, et de laisser échapper des bulles d'hydrogène qui, se dégageant autour du pôle cuivre et restant adhérentes au métal, l'isolent du liquide; l'électricité ne peut plus alors se porter sur le cuivre, et le courant finit par cesser. On dit alors que la pile est *polarisée.* Pour *dépolariser* la pile, il faut laisser le circuit ouvert pendant quelque temps, c'est-à-dire qu'il faut détacher le fil qui met les deux pôles en communication, puis sortir du liquide la plaque de cuivre et l'agiter pour obliger le gaz hydrogène à s'échapper. Ce moyen interrompt le service de la pile. Le procédé pratique consiste à faire absorber l'hydrogène, au fur et à mesure de sa production, par un corps oxydant entourant la plaque de cuivre. Ce corps, appelé *dépolarisant,* doit être sans action sur le liquide qui attaque le zinc; il ne doit pas attaquer le corps constituant le pôle positif (cuivre, charbon, etc.); il ne doit pas être trop mauvais conducteur de l'électricité, sans quoi il aurait l'inconvénient d'augmenter par trop la résistance intérieure de la pile; enfin, ce corps doit se combiner facilement avec l'hydrogène et donner naissance à des corps remplissant les deux premières conditions.

Les liquides sont les meilleurs dépolarisants.

621. Piles à deux liquides. La pile de Volta et ses dérivés étaient à un seul liquide. Les piles que nous allons étudier maintenant, sont à deux liquides : l'un attaque un des deux métaux; l'autre empêche la polarisation (620 *bis*).

622. Pile Daniell. Chacun de ses couples ou éléments se compose (*fig.* 132) d'un vase extérieur en grès ou en verre DD, dans lequel est placée une lame de zinc roulée en cylindre ZZ. Dans ce cylindre entre un second vase en terre poreuse PP, lequel contient une tige de cuivre C. Le cylindre de zinc Z et la tige de cuivre C portent chacun une patte en cuivre, destinée à transmettre le courant aux électrodes qui sont fixées par des vis de pression.

Fig. 132.

Pour mettre la pile en activité, on verse dans l'intérieur SS du vase poreux une dissolution saturée de sulfate de cuivre (dépolarisant), et, dans l'intérieur AA du vase en verre, de l'eau acidulée par de l'acide sulfurique. Le cuivre C plonge donc dans le sulfate de cuivre, et le zinc Z dans l'eau acidulée. Tant que les deux pôles ne communiquent pas, la pile est inactive; mais dès

que la communication est établie, on observe un courant dont l'intensité peut demeurer longtemps constante.

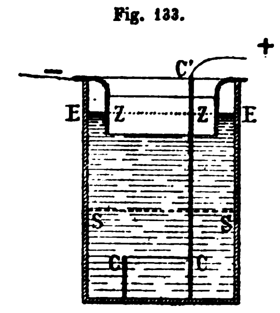
L'eau, contenue en AA, en présence du zinc et de l'acide sulfurique, est décomposée; son oxygène se combine avec le zinc pour former un oxyde de ce métal, qui se trouve alors électrisé négativement (—). L'hydrogène, à l'état naissant, se porte alors à travers le vase poreux (à cause des propriétés endosmotiques si prononcées de ce gaz) sur le sulfate de cuivre placé en SS, qui se trouve ainsi décomposé, par suite de la réduction de son oxyde et de la substitution d'hydrogène à une fraction de son cuivre. Un dépôt de cuivre sans adhérence et pulvérulent se forme alors, peu à peu, sur les parois de la tige de cuivre C, qui s'électrise positivement (+). Quant à l'acide sulfurique provenant de la décomposition du sulfate de cuivre, il se porte, toujours en traversant le vase poreux, sur l'oxyde de zinc, formé précédemment, pour le transformer en sulfate de zinc. L'action de la pile Daniell est conforme aux *lois de Faraday* : à chaque équivalent chimique (454) de zinc dissous correspond un équivalent de cuivre mis en liberté.

Dans cette pile, le zinc forme le pôle négatif, et le cuivre le pôle positif; dans la pile voltaïque, la disposition des pôles est inverse. Le résultat final est la formation de sulfate de zinc, un dépôt de cuivre au pôle positif et un appauvrissement de la dissolution de sulfate de cuivre. On pare à ce dernier inconvénient en plaçant des cristaux de sulfate de cuivre dans une corbeille ou une rigole, ou mieux une solution de ce sel dans un ballon dont le col plonge dans le liquide, et de telle façon que la dissolution soit toujours saturée de ce sel.

Il n'y a pas de dégagement de gaz et, par suite, pas de polarisation possible. Cette pile est très constante dans ses effets; elle a été prise comme unité de force électromotrice (612).

623. Pile Callaud. La pile Callaud se compose (*fig.* 133) d'un vase extérieur en verre, dans lequel on place à la partie supérieure un cylindre creux en zinc ZZ, sans fond, supporté par des crochets qui s'appuient sur les bords du vase; ce cylindre ZZ forme le pôle négatif. Au fond du vase, se trouve un autre cylindre CC en cuivre, fixé à une tige verticale CC' qui se recourbe au-dessus du verre, et forme le pôle positif. Cette tige est recouverte d'une enveloppe en gutta-percha, pour la protéger contre l'action destructive des liquides. Pour mettre l'appareil en activité, on verse jusqu'en EE, un peu au-dessous du bord supérieur du zinc, de l'eau contenant un dixième de solution saturée de sulfate de zinc. On amène ensuite au fond, à l'aide d'un siphon, une dissolution de sulfate de cuivre. Ce dernier liquide, par suite de sa densité plus grande, reste au fond du vase, jusqu'en SS, par exemple, tandis que le sulfate de zinc monte au-dessus. Cette pile supprime le vase poreux, les deux dissolutions n'étant sépa-

Fig. 133.



rées que par leur différence de densité. Les réactions sont les mêmes que pour la pile Daniell (622).

M. *Trouvé* remplace le cylindre en cuivre CC par un simple fil de ce métal, enroulé en spirale, au fond du vase, et dont un de ses bouts, formant le pôle positif, s'élève jusqu'en dehors de la surface du liquide; il est protégé par un tube de verre.

624. Pile Marié-Davy. Elle se compose : 1° d'un vase extérieur en verre, dans lequel on verse de l'eau acidulée, et qui contient un cylindre creux en zinc (pôle négatif); 2° d'un vase intérieur poreux contenant du sulfate de mercure en poudre, et délayé dans l'eau, et dans lequel on introduit un cylindre de charbon (pôle positif) auquel est soudée une lame de cuivre conduisant le courant.

L'action chimique est analogue à celle de la pile Daniell (622) : il y a réduction du sulfate de mercure, dépôt de mercure métallique dans le vase poreux, et formation d'une quantité équivalente de sulfate de zinc. Cette pile est peu énergique, mais elle a l'avantage de s'user très lentement, et par suite de donner un courant d'une grande constance. Ses inconvénients sont le danger de maniement du sulfate de mercure et le prix élevé de ce produit.

625. Pile Bunsen. Elle comprend deux vases. L'un extérieur, en faïence ou en verre, dans lequel entre un cylindre creux en zinc amalgamé (1), renferme de l'eau acidulée à 1/10 d'acide sulfurique. Dans le vase intérieur, poreux, se place un cylindre ou un prisme de charbon de cornue qui plonge dans de l'acide azotique (*dépolarisant*). Deux lames de cuivre, fixées au zinc et au charbon, servent à établir les communications.

L'eau est décomposée; le zinc, se combinant avec l'oxygène, se transforme d'abord en oxyde, puis en sulfate de zinc et s'électrise négativement. L'hydrogène traverse le vase poreux, décompose l'acide azotique, et forme de l'acide hypoazotique, dont une partie se dissout et l'autre se dégage, ce qui est un inconvénient. Le charbon s'électrise positivement.

La pile Bunsen est une des plus énergiques de celles à courant constant. Ce n'est qu'une modification de la pile de Grove, dans laquelle il y a une lame de platine au lieu de charbon.

626. Piles au bichromate de potasse. Ces piles, qui ne répandent aucune odeur, ni aucune vapeur acide, sont à deux liquides. Seulement, les deux dissolutions ne sont pas mises en évidence, et il n'y a pas de vase poreux pour les séparer. Leur matériel ne comprend qu'un seul vase en verre, qui a la forme d'une bouteille sphérique, dans la pile *Grenet* (*pile-bouteille*). Elle est fermée par un couvercle en ébonite, portant deux plaques de charbon parallèles, qui descendent dans le vase, et entre lesquelles est placée une plaque de zinc amalgamé atta-

(1) On se sert presque toujours de zinc amalgamé, c'est-à-dire combiné avec du mercure, parce qu'ainsi préparé le zinc n'est attaqué par l'acide sulfurique que lorsque les deux pôles de la pile sont en communication.

chée par son extrémité supérieure à une tige de laiton. Cette tige, glissant à frottement doux, permet de plonger le zinc dans le liquide, ou de le remonter dans le goulot, selon que la pile fonctionne ou non. De petits morceaux de caoutchouc durci empêchent le contact entre le zinc et les charbons. On verse une solution saturée de bichromate de potasse et ensuite de l'acide sulfurique. L'acide sulfurique attaque le zinc (pôle négatif); le bichromate de potasse, par l'acide chromique qui s'en dégage, absorbe l'hydrogène et empêche ainsi la polarisation. Le charbon constitue le pôle positif.

Pile au bichromate de soude. On a proposé de remplacer le bichromate de potasse par le bichromate de soude, à cause du prix moins élevé de ce dernier. Ce remplacement a l'avantage de donner un courant plus constant et une force électromotrice plus grande.

627. Pile Warren de la Rue. Chaque élément comprend un bâton de zinc non amalgamé (électrode soluble et négative) et un petit ruban d'argent recouvert de chlorure d'argent (électrode positive). Ce dernier est entouré d'une enveloppe de parchemin, pour éviter tout contact. Ces deux électrodes plongent dans une solution de 23 grammes de chlorhydrate d'ammoniaque pour 1000 d'eau. Le tout est dans un vase en verre, fermé par un bouchon en paraffine qui laisse passer le zinc et le ruban d'argent. Quand la pile est en activité, le zinc se dissout dans le sel ammoniac et forme du chlorure de zinc. L'hydrogène qui se dégage réduit le chlorure d'argent, et l'argent se précipite en une masse spongieuse qui se laisse facilement pénétrer par le liquide, en sorte que la réduction peut arriver jusqu'au centre de cette électrode. La force électromotrice de cette pile est de 1,03 volt.

628. Piles Leclanché. Cette pile, très employée, comprend deux types:

1° *La pile à vase poreux.* Elle se compose d'un vase prismatique en verre, à goulot cylindrique, dans lequel plongent côte à côte un bâton de zinc amalgamé et un vase poreux contenant une quantité égale de charbon de cornue et de peroxyde de manganèse concassé; au centre du vase poreux est placée une plaque de charbon surmontée d'une tête de plomb. Un bouton de laiton vissé sur cette tête constitue le pôle positif. Dans le vase en verre, on verse une dissolution saturée de chlorhydrate d'ammoniaque. Voici ce qui se passe : le chlore, provenant de la décomposition du sel ammoniac, attaque le zinc et le transforme en chlorure de zinc. L'ammoniaque est mise en liberté et l'hydrogène, traversant le vase poreux, se combine à l'oxygène pour former de l'eau, en réduisant le peroxyde de manganèse à l'état de sesquioxyde.

2° *Pile à agglomérés.* Les mêmes corps sont en présence, mais le vase poreux n'existe plus, et la plaque de charbon est serrée entre des agglomérés de charbon de cornue et de peroxyde de manganèse par des jarretières en caoutchouc; elle est séparée du bâton de zinc par un morceau de bois ou de porcelaine creusé en forme de gouttière. Le tout plonge dans la dissolution de sel ammoniac.

629. Accumulateurs ou piles secondaires. Les accumulateurs sont basés sur le principe suivant : Un courant électrique passant entre

deux plaques métalliques séparées par un corps humide, si l'on vient à supprimer la source, il se développe dans les plaques un courant en sens contraire du premier, et qu'on a appelé *courant secondaire.* En réunissant plusieurs plaques de ce genre, on constitue une véritable pile. Les accumulateurs servent à emmagasiner une grande quantité d'électricité pendant un temps plus ou moins long, puis à la restituer; ils ont sur les piles primaires l'avantage d'accumuler une grande quantité d'électricité, sous un faible poids et un petit volume, et de donner naissance, au moment voulu, à un courant d'une plus grande intensité que le courant primaire, mais limité à une durée relativement courte. C'est à Gaston Planté qu'on doit le premier accumulateur (1859); il se compose de deux lames de plomb enroulées concentriquement en spirale et séparées par du caoutchouc, qui empêche tout contact de se produire; ces lames sont contenues dans un vase en verre fermé, contenant de l'acide sulfurique étendu des 9/10 d'eau; deux bornes métalliques sont reliées aux deux lames de plomb, et constituent les pôles.

Pour *charger* cet élément, on le fait communiquer par ses deux bornes avec une ou plusieurs piles primaires ou avec une machine électrique quelconque. Le courant décompose l'eau; l'oxygène se porte sur la lame de plomb qui communique avec le pôle positif de la pile primaire, et il se forme sur cette plaque un dépôt brun de bioxyde de plomb; l'hydrogène se rend sur la lame négative. Lorsqu'on commence à observer un dégagement d'oxygène, c'est que l'accumulateur est complètement chargé; il faut alors interrompre l'action de la pile qui, à partir de ce moment, fonctionnerait en pure perte.

Pour *décharger* l'appareil, on ferme le circuit sur lui-même; il donne alors naissance à un courant en sens contraire du précédent; le peroxyde de plomb formé tout à l'heure se réduit d'abord à l'état d'oxyde; puis forme du sulfate de plomb, par sa combinaison avec l'acide sulfurique; l'oxygène, ainsi dégagé, se porte sur la lame de plomb négative, l'oxyde d'abord, puis du sulfate de plomb s'y forme, comme à l'autre lame. Quand tout le peroxyde de plomb est réduit, et que les deux éléments sont recouverts de sulfate de plomb, le courant secondaire cesse, et l'accumulateur peut être chargé de nouveau. Sa force électromotrice varie de 2,53 à 2,02 volts.

Pour qu'un accumulateur soit utilisable, il faut lui faire subir un grand nombre de charges et de décharges successives. Aussi, en 1880, M. Faure a-t-il proposé, au lieu de déposer électriquement l'oxyde de plomb sur les plaques par des charges et décharges répétées, de l'y fixer par des procédés mécaniques. Mais ces plaques sont moins solides que les autres, l'oxyde de plomb s'en détache facilement et tombe au fond du vase; aussi, malgré les perfectionnements apportés à l'accumulateur Faure, cet appareil est-il peu usité.

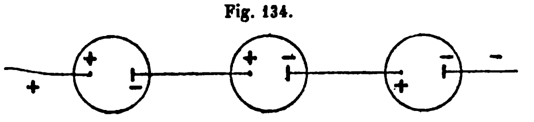
On a construit des accumulateurs au cuivre et avec d'autres métaux, mais ceux au plomb sont les plus employés.

Un accumulateur rend de 60 à 65 p. 100 de la force électrique qu'on lui fournit. On peut les accoupler comme les piles (voir ci-après).

630. Accouplement des piles. La force développée par une pile unique étant très faible, on est obligé d'avoir recours, pour ainsi dire toujours, à plusieurs piles, en les réunissant, soit en *tension*, soit en *quantité*.

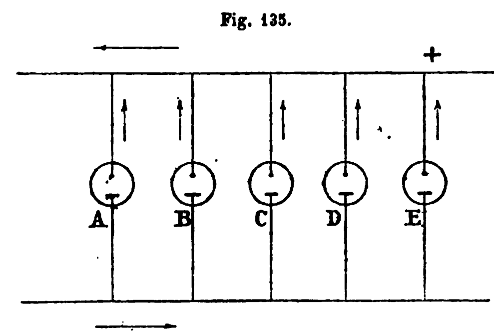
Quand on relie ensemble plusieurs éléments identiques A, B, C, etc., de façon que le pôle positif de l'un soit rattaché par un fil au pôle négatif de l'autre, et ainsi de suite (*fig.* 134), on dit que ces éléments sont accouplés ou réunis en *tension* ou en *série*. Dans ce cas, la force électromotrice totale et la résistance intérieure sont proportionnelles au nombre des éléments; mais l'intensité est la même que s'il n'y avait qu'un seul élément, puisqu'elle est donnée par la formule $I = \frac{E}{R}$, et que E et R ont augmenté dans les mêmes proportions.

Fig. 134.



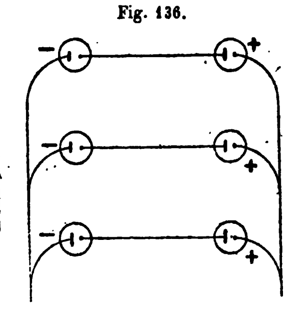
Si on réunit d'un côté tous les pôles positifs, et d'un autre tous les pôles négatifs des éléments (*fig.* 135), on dit que ces éléments sont réunis en *quantité* ou en *dérivation*. Dans ce cas, la résistance intérieure est inversement proportionnelle au nombre des éléments et la force électromotrice totale est égale à celle d'un seul élément. Quant à l'intensité totale, elle est proportionnelle au nombre d'éléments associés.

Fig. 135.



On peut encore grouper les éléments d'une façon mixte, en réunissant en quantité trois groupes formés chacun de deux éléments en série (*fig.* 136). Le mode de groupement des éléments n'est pas sans influence sur les effets que l'on veut obtenir de la pile. Si l'on veut beaucoup de *volts*, c'est-à-dire une grande force électromotrice, on emploiera le groupement en tension ou en série. Si on veut beaucoup d'*ampères*, c'est-à-dire une grande intensité, on groupera les éléments en quantité.

Fig. 136.



631. Choix des piles. Les sonneries électriques, les signaux, appels, etc., se servent avec avantage des piles Leclanché, de Lalande et Chaperon, Maiche, Marié-Davy.

La télégraphie et la téléphonie demandent surtout les éléments Daniell, Callaud, Meidinger, Leclanché, de Lalande et Chaperon, Maiche.

La galvanoplastie, la dorure, l'argenture, etc., s'adressent principalement aux piles Daniell et Bunsen.

Pour l'éclairage électrique, on peut prendre les piles Bunsen, mais les vapeurs nitreuses qui s'en dégagent les excluent des emplois domestiques, et il est préférable d'employer les piles au bichromate, qui ne provoquent aucun dégagement. Les installations d'éclairage en grand ne sont pas alimentées par des piles, mais par des machines magnéto ou dynamo-électriques (646 et suivants).

632. Distribution de l'électricité. L'électricité produite dans une usine centrale, soit par des piles, soit par des machines électriques, peut être distribuée ou répartie en différents points d'un réseau déterminé. Pour arriver à ce résultat, on peut charger des accumulateurs dans l'usine et les transporter au lieu d'emploi; mais c'est un moyen coûteux; il n'est utilisable que dans des cas particuliers.

Le moyen le plus employé consiste à établir, à partir de l'usine, des canalisations souterraines, comme on établit des canalisations pour distribuer l'eau; mais les tuyaux sont remplacés par des conducteurs métalliques pleins, que le courant électrique traverse. Durant leur parcours, ces conducteurs sont soutenus, pour que le fluide ne s'échappe pas, au moyen de supports constitués en matières isolantes, telles que le caoutchouc, la gutta-percha, la paraffine, l'ébonite, la porcelaine, le verre, la soie, etc.; ils doivent être à l'abri de l'humidité, et les fils eux-mêmes sont recouverts d'une couche de gutta-percha autour de laquelle sont enroulés et très serrés des fils de soie ou de coton.

Une première difficulté naît de la longueur des conducteurs, car la résistance d'un conducteur est proportionnelle à sa longueur. Si le conducteur est très long, il faudra augmenter la force électromotrice de la source pour obtenir l'intensité voulue. Pour cette raison, il faut faire usage de conducteurs de longueur minimum; c'est aussi plus économique. Une seconde difficulté surgit du diamètre des fils. On se trouve pris dans le dilemme suivant :

La résistance du conducteur est inversement proportionnelle à sa section; on a donc intérêt à prendre un fil aussi gros que possible pour avoir une grande intensité; mais alors la question économique vient se mettre au travers, car la dépense augmente avec le diamètre. Aussi, comme moyen terme, faut-il s'en tenir à des fils moyens et tenir compte, pour la section à leur donner, de l'emploi qu'on veut en faire; c'est ainsi que pour les appareils n'exigeant qu'un faible débit, comme les sonneries, les téléphones, etc., on pourra n'employer que des fils fins, et que pour les appareils exigeant un débit considérable, comme l'éclairage électrique, on sera obligé d'avoir recours aux gros fils.

Les conducteurs diffèrent entre eux par la nature du métal qui les constitue; ils offrent des résistances variables au passage du courant (615).

Le cuivre est le métal qu'on emploie le plus; mais le fer, l'acier et le bronze silicieux se recommandent pour les fils aériens (télégraphes, etc.)

qui exigent un corps d'une grande ténacité et qui coûtent meilleur marché que le cuivre; le platine s'emploie pour les parties du circuit susceptibles d'être portées à une très haute température; le plomb n'est utilisé que pour déterminer l'ouverture, c'est-à-dire la rupture des circuits quand ils atteignent la température où ce métal entre en fusion.

Des dispositions doivent être prises pour que le fluide ne soit produit que quand on en a besoin, de façon à ce qu'il n'y ait pas de travail dépensé en pure perte. L'usine centrale fonctionne continuellement; sur elle sont greffées des dérivations, mais ces dérivations ne sont parcourues par le courant que par la volonté du consommateur. Les appareils destinés à transmettre le fluide dans une direction déterminée et à l'interrompre quand il est devenu inutile, portent le nom de *commutateurs*. La télégraphie les emploie depuis longtemps.

633. Prix de revient des piles. On prend le cheval-heure comme unité de travail; c'est le travail produit par une machine travaillant pendant une heure, à raison de 75 kilogrammètres ou d'un cheval-vapeur par seconde. Comme il y a $60 \times 60 = 3{,}600$ secondes dans une heure, le cheval est représenté par $75 \times 3{,}600 = 270{,}000$ kilogrammètres.

Le travail produit dans l'unité de temps par le courant s'exprime par la formule :

$$T = \frac{EI}{g} \qquad (613)$$

dans laquelle T représente des kilogrammètres, E des volts, I des ampères et g l'accélération de la pesanteur ($9^m{,}81$, à Paris).

Par une série de transformations, on arrive à la formule :

$$P = 27{,}50 \times \frac{h \times n}{E};$$

P, poids en grammes du réactif consommé pour produire un cheval-heure;
h, équivalent chimique du corps considéré (p. 550);
n, nombre d'équivalents engagés dans la réaction;
$E =$ nombre de volts.

Comme il y a toujours perte et qu'on a souvent aussi à faire à des actions locales, on doit multiplier le chiffre théorique obtenu par 2,5 pour obtenir la dépense pratique avec une approximation suffisante.

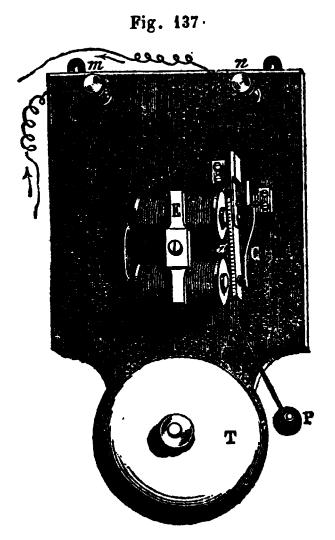
Le prix moyen de revient du cheval-heure, dans la pile Daniell, est théoriquement de $0^f{,}53$ de zinc et $1^f{,}88$ de sulfate de cuivre. Mais, pratiquement, il faut compter sur une dépense moyenne de 5 francs par heure.

634. Électro-magnétisme. Œrstedt, en 1820, observa que lorsqu'on approche un fil métallique, traversé par un courant, d'une aiguille aimantée mobile, cette aiguille tend à se mettre en croix avec le courant. Ce phénomène a conduit Ampère à la découverte d'un autre principe: Si l'on enroule un grand nombre de fois, autour d'un barreau de fer doux, un fil métallique parcouru par un courant électrique, on réalise ce qu'on a appelé un *électro-aimant*. Tant que passe le courant dans le fil, le fer doux présente les propriétés de l'aimant (attraction ou répulsion) et avec une intensité d'autant plus forte qu'on aura enroulé le fil un plus grand nombre de fois autour du barreau et que la source électrique aura une plus grande intensité.

Les électro-aimants ont généralement la forme d'un fer à cheval, sur chacune des deux branches duquel on dispose deux bobines de bois qu'on entoure du fil conducteur recouvert de soie; il faut que l'enroulement du fil ait lieu dans le même sens sur chaque bobine, afin que les deux actions soient concordantes. Plus le fer est doux, plus l'électro-aimant est puissant.

635. Sonnerie électrique. La sonnerie *trembleuse* (*fig.* 137) se compose d'un électro-aimant E, qui, sous l'action du courant envoyé par le poste expéditeur, peut attirer une palette métallique *a*, munie d'un marteau P, et portée par un ressort antagoniste. Quand le courant ne passe pas dans l'électro-aimant, la palette *a*, maintenue à une petite distance de ce dernier, s'appuie contre un ressort *c*, mis en communication avec la terre par le fil *n*. Mais, dès que le courant passe, la palette se trouvant attirée par l'électro, cesse de toucher le ressort *c*; aussitôt, le circui se trouvant interrompu, l'aimantation cesse, et le ressort antagoniste, dont l'action n'est plus contrariée, force la palette *a* à reprendre sa position primitive. Quand elle revient au contact du ressort *c*, le courant est rétabli; il y a donc nouvelle attraction de la palette, et ainsi de suite. Ces oscillations successives forcent le marteau P à frapper le timbre T. Pour faire passer le courant autour de l'électro, il suffit d'appuyer sur un bouton métallique, qui établit la communication.

Fig. 137.



636. Induction. Si l'on fait *mouvoir* le pôle d'un aimant à proximité d'un fil métallique formant un circuit fermé, on détermine dans ce fil un courant de très courte durée dit *induit*, dont le sens change suivant qu'on approche ou qu'on éloigne l'aimant. On augmente de beaucoup cet effet en faisant agir l'aimant à proximité d'une bobine, qu'un fil métallique entoure un grand nombre de fois, et dans l'axe de laquelle on place un barreau de fer doux.

On observe encore les mêmes phénomènes en disposant un aimant fixe dans l'intérieur d'une bobine, enroulée de plusieurs tours de fil de métal, et devant lequel aimant on fait osciller une armature de fer doux.

L'éloignement ou le rapprochement de l'aimant du fer doux provoquent une plus ou moins grande intensité dans la force de l'aimant; or, chaque fois que l'aimant diminue ou augmente d'intensité, il développe un courant induit dans un circuit fermé placé près de lui. (Voir *Bobines d'induction*, **642**.)

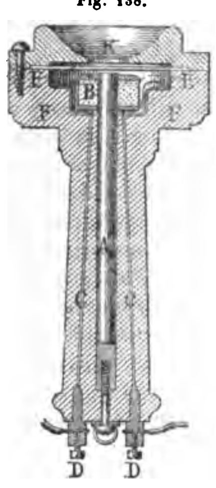
637. Téléphonie. Le premier téléphone pratique, celui de l'Américain Bell, date de 1877; depuis, un grand nombre d'appareils ont vu le jour.

Nous nous contenterons d'indiquer les dispositions du système Bell et du système employé à Paris par le service téléphonique (organisé en 1879).

Tout téléphone se compose d'un *transmetteur* (appareil sur lequel on parle) et d'un *récepteur* (appareil dans lequel on écoute). L'appareil mis à Paris à la disposition des abonnés au téléphone utilise un transmetteur du système *Ader*, et un récepteur du système *Bell* modifié par Ader.

638. Téléphone magnétique Bell. Le récepteur primitif de Bell était identique à son transmetteur. Il se compose (*fig.* 138) d'un barreau aimanté A, portant à l'une de ses extrémités une petite bobine B, sur laquelle est enroulé, un grand nombre de fois, un fil recouvert de soie, dans le but de l'isoler. A une faible distance de la bobine se trouve une plaque très mince de fer doux K surmontée d'une sorte d'entonnoir ou embouchure. Ces organes sont solidement encastrés dans un morceau de bois de la forme indiquée par la figure 138.

Fig. 138.



De la bobine partent deux fils qui sont le prolongement de celui qui l'entoure. Ces deux fils E C longent l'appareil de chaque côté du barreau aimanté et aboutissent chacun à une borne D. Ils se prolongent au delà pour aboutir aux bornes d'un appareil semblablement disposé à celui que nous venons de décrire.

A l'état de repos, la plaque de fer doux, placée au fond de l'embouchure de l'appareil, et devant la bobine, est aimantée par suite de l'influence de l'aimant A. Si l'on approche du barreau la plaque, l'aimantation de celle-ci augmente; si on l'éloigne, c'est le phénomène inverse; mais, chaque fois que l'aimantation change d'intensité, en plus comme en moins, il se développe dans le circuit fermé de la bobine un courant induit qui ne dure que très peu de temps. Si l'on vient à émettre des sons devant la plaque placée au fond de l'embouchure, on la fait vibrer, à cause de son peu d'épaisseur, et cet effet est suffisant pour produire un courant dans la bobine; ce courant traverse l'appareil, suit le fil de la ligne et arrive au récepteur; la bobine de ce dernier, constituée comme celle du transmetteur, étant traversée par un courant, augmente l'aimantation de l'aimant qu'elle entoure et qui se conduit alors comme un électro-aimant; cette augmentation étant en rapport des sons émis devant le transmetteur, la plaque du récepteur sera attirée par cet aimant devenu plus fort, et elle reproduira, par ses oscillations, les sons primitivement émis; mais atténués.

639. Téléphone Ader. Microphone-transmetteur (1). Il se compose (*fig.* 139) d'une planchette sur laquelle sont collées trois traverses de

(1) Le principe du microphone est dû à Hughes.

charbon de cornue parallèles *a*, *b* et *c*, et supportant entre elles dix petits cylindres E de même substance. Ces cylindres sont terminés à leurs extrémités par des tourillons qui s'engagent avec beaucoup de jeu dans des trous percés dans les traverses. Les traverses extrêmes *a* et *c* sont en communication avec une des bornes P ou N, lesquelles sont intercalées dans le circuit. Ces organes sont enfermés dans une boîte en bois mince, formant pupitre. Les charbons du microphone sont collés intérieurement sur la plaque-pupitre. Des fils, partant des bornes P et N, communiquent d'une part avec le pôle positif d'une pile P, et d'autre part avec l'une des bornes d'un récepteur R; de l'autre borne de ce récepteur, le fil de ligne se rend au pôle négatif de la pile; de cette façon le circuit est complètement fermé (*fig.* 140).

Fig. 139.

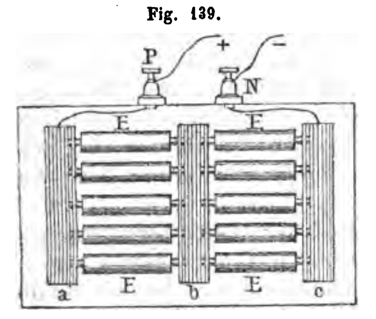
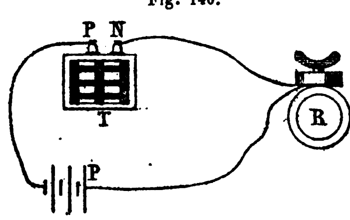
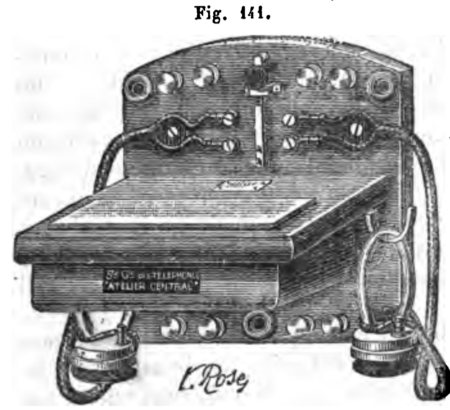


Fig. 140.



Le *récepteur Ader* est analogue à celui de Bell (638); seulement il a deux bobines, une entourant chaque pôle de l'aimant, et devant cet aimant se trouve un anneau en fer doux, qui produit l'amplification des sons, en servant d'armure à l'aimant qu'il surexcite; l'aimant, étant circulaire, sert en outre de poignée. (On voit les récepteurs, en bas, à droite et à gauche de la figure 141.)

Fig. 141.



640. Marche générale des appareils. Le contact entre les cylindres mobiles et les charbons du microphone-transmetteur (*fig.* 139) qui n'a lieu que par quelques points de leur surface, se trouve modifié par la moindre vibration. Si l'on parle devant la planchette recouvrant le système, on changera donc la résistance et, par suite, l'intensité du courant envoyé par la pile. L'aimant du récepteur deviendra donc plus fort, et attirera la plaque de fer doux placée devant lui. Par conséquent, la plaque de fer doux du récepteur exécutera un mouvement correspondant, et reproduira les paroles prononcées, les chants ou les bruits.

641. Installations téléphoniques. Les postes du genre Ader sont appelés *microtéléphoniques*. Toute installation se compose : d'un microphone-transmetteur, dont la forme pupitre est une des plus usitées (*fig.* 141); de deux récepteurs, que l'on voit sur notre figure, accrochés à droite et à gauche à un demi-anneau (le crochet de droite constitue un levier mobile et sert de commutateur); d'une sonnerie électrique (635), montée généralement sur une dérivation du courant principal; enfin, des piles nécessaires pour que ce courant se produise, et des fils conducteurs.

642. Téléphones à bobines d'induction. L'installation précédente est à *courant primaire*. On l'a perfectionnée, en y appliquant les *courants d'induction* (636); et ce moyen s'impose toutes les fois qu'on veut communiquer à une distance notable. Les courants induits ont une très grande tension, et se prêtent bien mieux que les courants primaires aux transmissions d'ondes sonores. La modification consiste à intercaler dans le circuit une bobine de Ruhmkorff. C'est une bobine en bois, sur laquelle on enroule d'abord un long fil de cuivre revêtu de soie, et par-dessus, dans le même sens, un autre fil du même genre, mais plus mince. On intercale les extrémités du premier fil, appelé *fil inducteur*, dans le circuit d'une pile, et dès que le courant vient à y passer, le second fil est parcouru par un autre courant, induit, d'une bien plus grande intensité que le premier, mais qui ne dure qu'un instant. Pour qu'il se reproduise, il faut interrompre continuellement, puis rétablir à de très courts intervalles le courant primaire, ou tout au moins en changer l'intensité, ce qu'on réalise au moyen d'un interrupteur spécial; de cette façon, le courant induit cesse, puis reparaît, et cela à de très courts intervalles. Le courant induit alterne continuellement de sens. Il est *inverse* du courant inducteur, c'est-à-dire a un sens contraire, quand ce dernier se produit ou quand il augmente d'intensité; au contraire, le courant induit est *direct*, c'est-à-dire du même sens que le courant inducteur, quand ce dernier diminue d'intensité, ou même cesse complètement. En outre, une barre de fer ou un faisceau de fils de fer est intercalé dans l'axe de la bobine; chaque courant instantané lui communiqué des effets magnétiques, ce qui provoque un renforcement de l'action électrique développée dans le fil induit de la bobine.

On comprend l'utilité de cette bobine en téléphonie, puisque le courant induit est bien plus intense que le courant primaire. Dans ce cas, les extrémités du fil le plus fin, c'est-à-dire du fil induit, sont reliées aux fils de la ligne, tandis que le fil inducteur ou gros fil est réuni au circuit d'une pile, de même du reste que le transmetteur.

643. Réseaux et lignes téléphoniques. L'établissement de communications entre les habitants d'une ville comme Paris nécessite un réseau de lignes très étendues. A un bureau central aboutissent les lignes de tous les abonnés, et la fonction de ce bureau est de réunir momentanément entre elles les lignes des abonnés qui désirent converser ensemble, et d'interrompre ensuite la communication.

Les lignes téléphoniques et télégraphiques sont aériennes dans un grand nombre de pays. En Amérique notamment, les rues de certaines villes sont encombrées, dans leur partie supérieure, de fils formant de véritables toiles d'araignée. A Paris, ces lignes sont souterraines, et ont profité des canalisations d'égouts existantes.

Les lignes souterraines de Paris sont réunies, au nombre de 14, dans des câbles recouverts de plomb, et portés sur des crochets spéciaux ; ces 14 lignes ne représentent en réalité que 7 lignes d'abonnés, car il y a pour chacune un fil d'aller et un fil de retour. En pénétrant dans le bureau central, les lignes de chaque câble se séparent, et chaque fil porte alors une plaque indicatrice du nom et du numéro de l'abonné. On met les abonnés en communication entre eux au moyen de commutateurs.

644. Prix du téléphone. *Système Ader :*

Un transmetteur (639)	100 fr.
Deux récepteurs (639)	100
Une sonnerie trembleuse (635)	15
Quatre éléments Leclanché (628)	10
Total	225 fr.

Coût de la ligne, en fil d'acier galvanisé ou en fil de bronze siliceux. Dans le cas de l'acier (diamètre : 2 millim.), le prix d'un kilomètre de fil (du poids de 25 kilog.) revient à $27^f,50$; les 18 poteaux nécessaires à soutenir les fils, à 144 francs; les 18 isolateurs sur lesquels les fils sont placés, à 27 francs; soit en tout, $198^f,50$.

Dans le cas du bronze, le diamètre de 1 millimètre 1/10 étant suffisant, le poids d'un kilomètre de fil n'est que de $8^k,45$, mais le prix est néanmoins de $31^f,70$; seulement, on n'a besoin que de 10 poteaux, soit 80 francs; et par conséquent que de 10 isolateurs, soit 15 francs; le prix total ressort donc à $126^f,70$. En résumé, l'établissement complet du téléphone, avec les lignes en fil d'acier, revient à 225 fr. $+ 198^f,50 = 423^f,50$, et avec le fil en bronze siliceux, à 225 fr. $+ 126^f,50 = 351^f,70$.

645. Téléphonie à grande distance. La téléphonie à grande distance réclame des installations un peu différentes, et plus minutieuses que la téléphonie à courte distance. M. Van Rysselberghe s'est servi, en 1882, des fils télégraphiques eux-mêmes comme véhicule de la parole, de sorte que le même fil transmet les dépêches et la voix. L'indépendance des deux systèmes est assurée par des dispositions particulières. Ce système a été appliqué entre Paris et Reims, entre Paris et Bruxelles, etc. En outre, le téléphone fonctionne entre Paris et Marseille (1888), et entre Paris et Londres (1890). Cette dernière section est aérienne. Elle se compose, comme la ligne de Paris à Marseille, de deux fils de bronze courant parallèlement, et croisés de distance en distance pour atténuer les effets d'induction qu'ils pourraient exercer l'un sur l'autre.

646. Générateurs mécaniques d'électricité. Les piles ne peuvent produire de l'électricité qu'en faible quantité, et lorsqu'on veut un courant d'une grande force, on doit s'adresser à des générateurs basés sur l'électro-magnétisme (634) et l'induction (636 et 642).

Historique. La découverte des phénomènes d'induction est due à Ampère et à Faraday (1831). La première machine basée sur ces principes est celle de Pixii (1832); peu après vint celle de Clarke, composée d'un fer à cheval aimanté, entre les branches

duquel tournent deux noyaux de fer doux entourés de fil isolé et formant bobine. En tournant, les bobines passent devant les pôles de l'aimant, sont influencées chaque fois par son magnétisme et deviennent électro-aimants. Il en résulte chaque fois un courant de très courte durée dans le fil qui les entoure. Seulement, ces courants sont alternatifs et changent continuellement de sens, attendu que les bobines vont successivement d'un pôle à l'autre de l'aimant. Ampère a imaginé un redresseur de courants très ingénieux. Plus tard, vinrent les machines de Nollet (1849), de Van Malderen et de Masson, inventeur de la machine à courants alternatifs, adoptée par la Société « l'Alliance » (1863).

La bobine de W. Siemens (1856) fut le signal de nouveaux progrès. Elle se compose d'un cylindre en fer doux, sur lequel deux rainures profondes sont ménagées, suivant deux génératrices opposées; dans cette double rainure est enroulé du fil (649). La bobine tourne entre les pôles d'une série d'aimants, dans la machine de Siemens; dans celle de Wilde, la même bobine tourne entre des électro-aimants, excités eux-mêmes par une seconde machine. Le principe de l'auto-induction était trouvé (1867), et l'honneur en revient à Wilde. Ladd construisit une autre machine dans laquelle l'excitation est réalisée par une bobine clavetée sur le même arbre que la machine principale. Entre temps, M. Worms de Romilly (en 1866) avait eu l'idée de dénuder les fils de la bobine induite, et d'y faire frotter les deux collecteurs. Mais il faut arriver à Gramme (en 1870) pour voir réaliser une machine dynamo-électrique réellement utilisable. Il n'est que juste de dire cependant que l'italien Pacinotti a revendiqué cette invention, dont on retrouve le principe dans un brevet pris par lui dès 1861.

Classification. 1° Machines *magnéto-électriques*, où l'on fait usage d'aimants permanents; 2° machines *dynamo-électriques*, où l'on fait usage d'électro-aimants. Ces dernières ont donné les résultats les plus appréciables ; aussi, seront-ce les seules sur lesquelles nous nous arrêterons.

647. Machines dynamo-électriques : mode d'excitation. Les dynamos donnent un champ magnétique beaucoup plus intense, et produisent, à volume égal, des courants bien plus énergiques que les machines magnéto-électriques.

Leurs électro-aimants inducteurs sont excités par un courant provenant, soit d'une autre dynamo plus faible nommée *excitatrice* (système Wilde et Ladd), soit par un courant provenant de la dynamo elle-même, qui est dite alors *auto-excitatrice* (système Gramme).

Dans ce dernier cas, le premier courant est provoqué par l'aimantation, quelque faible qu'elle soit, que retient toujours le fer des électro-aimants; ceux-ci sont alors renforcés dès que le courant se produit et les deux forces augmentent jusqu'à une limite dépendant de la vitesse de rotation et de la résistance croissante que les aimants opposent à la rotation de l'induit.

Dans les machines excitées *en série*, le courant de l'induit pénètre autour des électro-aimants avant de traverser le circuit. Dans ce cas, l'intensité du courant varie en sens inverse de la résistance; aussi lorsque cette dernière augmente, le courant s'affaiblit et par suite aussi l'énergie de l'inducteur.

Les machines sont dites *shunt-dynamos* lorsqu'elles sont excitées en dérivation. L'anneau induit forme un circuit complet avec le conducteur extérieur, et sur ce circuit (généralement sur les bornes de la machine) on prend une dérivation qu'on dirige dans le fil de l'électro. Ce dernier se trouve ainsi associé *en quantité* (630) avec le circuit principal.

L'intensité du courant principal diminue quand la résistance augmente; mais comme, en conséquence, l'intensité augmente dans la dérivation, les électros inducteurs deviennent plus énergiques, et atténuent la diminution qui tend à se faire dans le circuit principal.

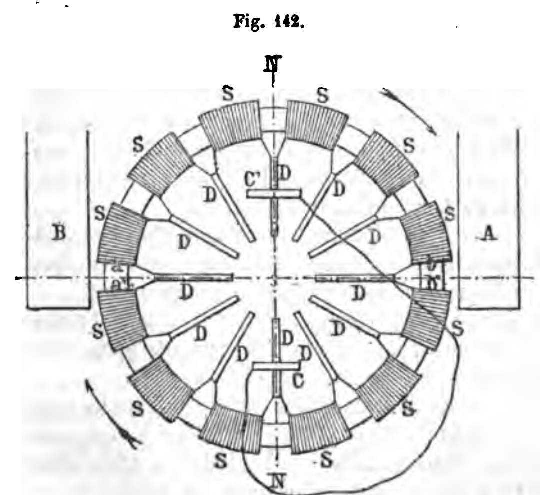
Enfin, les machines sont dites *compound* (*composées*) ou à *double circuit* lorsque les électros sont revêtus de deux fils, l'un fin dans lequel passe un courant dérivé (*shunt*), l'autre gros dans lequel on envoie le courant du circuit extérieur (*série*). L'expérience détermine les diamètres et longueurs qu'il faut donner aux fils pour qu'entre certaines limites de résistance la force électromotrice reste constante.

Classification. Les machines dynamos comprennent : les *machines à anneau*, les *machines à tambour*, les *machines à pôles* et les *machines à disque.* Nous n'en indiquerons que les types principaux.

Les machines à anneau donnent des courants qui sont alternativement de sens contraires. Ces machines, comme toutes celles qui donnent lieu à des *courants alternatifs*, sont dites *bipolaires.* On peut cependant redresser ces courants inverses, au moyen de commutateurs, ou par la disposition des collecteurs, et réaliser des machines dites à courants continus, c'est-à-dire envoyant dans la ligne des courants toujours de même sens. Dans certaines machines employées pour l'éclairage on ne redresse pas les courants, qui changent de sens jusqu'à 130 fois par seconde. Les machines *unipolaires* seules peuvent fournir des courants réellement *continus*, mais elles ne sont pas encore du domaine industriel.

648. Machines à anneaux Gramme. L'induit, monté sur un arbre mobile, est constitué par l'anneau Gramme (*fig.* 142). C'est un anneau NN formé d'un faisceau de fils de fer doux, sur lequel sont enroulées des spirales ou bobines de fil de cuivre isolés S (généralement 120); ces bobines se touchent, et sont reliées entre elles en série, c'est-à-dire que le brin sortant de l'une d'elles communique avec le brin entrant de la suivante.

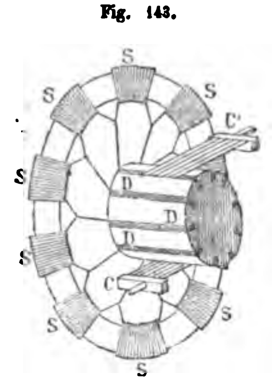
Fig. 142.



Chaque liaison est soudée avec une barre de cuivre D, placée parallèlement à l'axe de rotation, de telle sorte que l'ensemble de ces barres radiales DD forme autour de l'axe un cylindre appelé *collecteur* (*fig.* 143), dont les génératrices métalliques sont isolées les unes des autres. La surface extérieure ou collecteur est, au contraire,

mise à nu et constamment frottée, dans son mouvement, par deux balais fixes de fil de cuivre rouge, C, C′ placés aux deux extrémités d'un même diamètre. Les courants induits, produits dans les deux moitiés de l'anneau, quand ce dernier tourne entre les deux pôles A et B d'un électro-aimant ou même d'un aimant, sont recueillis par les balais (*fig.* 142 et 143). Ces balais fixes sont constamment en contact avec celles des pièces D correspondant à la ligne neutre NN de l'anneau mobile. Si l'on donne un mouvement de rotation à l'anneau, dans le sens des flèches, le système des spirales situées à droite de la ligne neutre sera parcouru par des courants positifs, ayant leur maximum en *bb* et leur minimum en NN; pour les spirales situées à gauche de cette même ligne le courant sera de même maximum en *aa′*, minimum en NN. Les courants recueillis par les balais, bien que de sens contraires, s'ajoutent comme ceux de deux piles dont les pôles de même nom seraient reliés à une même extrémité de la ligne.

Fig. 143.



L'*inducteur* se compose de deux noyaux de fer doux sur lesquels sont enroulées des spires de fils de cuivre isolés. C'est entre ces noyaux que l'*induit* peut tourner, au moyen d'un moteur quelconque.

On ne voit, dans cette machine, aucune source préalable d'électricité ou de magnétisme ; mais, néanmoins, dès que l'induit tourne, on constate la production d'un courant très fort. On l'attribue au magnétisme rémanent (persistant) du fer doux qui constitue l'inducteur, et aussi à l'action telluro-électrique (action de la terre). En réalité, si les noyaux de fer doux s'aimantent lorsque l'induit tourne entre eux, ce magnétisme n'est maintenu que par le courant même que produit la machine, qui, au moyen d'une dérivation, ou simplement d'une intercalation dans le circuit, traverse les fils des électro-aimants. La machine Gramme est une application de la **loi de Lenz** qui s'énonce ainsi :

Quand on déplace un circuit fermé dans le voisinage d'un courant ou d'un aimant, ou réciproquement, il se développe dans ce circuit un courant induit de sens contraire à celui qui aurait produit le mouvement.

En effet, lorsqu'une spirale S s'approchera d'un des pôles de l'aimant, il s'y produira un courant de même sens que les courants particulaires de l'aimant (puisque les pôles de même nom se repoussent).

La grosseur et la longueur du fil des bobines varient suivant les usages auxquels on destine la machine. Si le circuit extérieur a une grande résistance, on prendrait un fil long et fin pour les bobines, afin d'obtenir une grande force électromotrice. Si la résistance est faible, et qu'on veuille obtenir une forte intensité, les fils devront être courts, mais de fort diamètre ; quelquefois même ils sont remplacés par de petites barres méplates.

Les types de machines Gramme, à courant continu, sont très nombreux.

Dans le type normal ou d'atelier, le bâti constitue l'armature. Cette machine, en tournant à la vitesse normale de 900 tours par minute, absorbe une force de 3 chevaux-vapeur et peut alimenter un régulateur Gramme de 500 carcels; il en existe qui font jusqu'à 2000 tours par minute. Les prix en sont très variables, comme l'indique le tableau suivant, pour le type dit *supérieur :*

Force, poids et prix des machines Gramme, type supérieur.

NUMÉROS des machines.	NOMBRE de tours par minute.	INTENSITÉ en ampères.	DIFFÉRENCE de potentiel aux bornes, en volts.	POIDS des machines en kilog.	PRIX des machines en francs.
	tours	amp.	volts	kilog.	fr.
1	600	550	70	4300	6500
2 *bis*	725	470	70	3335	5400
2	800	350	70	2320	4200
3	1000	230	70	1250	3000
4 *bis*	1100	220	55	1100	2400
4	1200	150	55	710	1700
5	1400	80	55	445	900
6	1500	40	55	260	600
7	1500	20	55	170	500
8	1600	10	55	108	400
9	2000	10	25	45	300

649. Machines à tambour Siemens, Edison, etc. Les machines à tambour ont comme *induit* une armature *Siemens*. C'est un noyau cylindrique allongé en fer doux, sur lequel le fil est enroulé longitudinalement et seulement sur la partie extérieure du cylindre.

On évite ainsi la perte occasionnée, dans les bobines de l'anneau Gramme, par la résistance des parties intérieures. Il y a bien encore une petite perte provenant du croisement des fils sur les deux bases du cylindre, car ces portions croisées n'ont pas d'action utile; mais on a réduit cet effet autant que possible en donnant au cylindre une forme très allongée. L'armature est divisée en huit parties indépendantes, à la façon de l'anneau Gramme. Un collecteur et des balais semblables à ceux de cette dernière machine recueillent les courants produits successivement dans chaque bobine, lorsque le tambour ou armature tourne entre les deux électro-aimants, constituant l'induit.

Dans la machine *Siemens* ces électro-aimants ont les pôles de même nom placés en regard, de façon à former deux champs magnétiques orientés inversement.

Les machines *Edison* ont une armature Siemens à bobines de nombre impair, un collecteur Gramme, etc. Leur particularité consiste dans les fortes dimensions de l'inducteur, constitué par deux bobines verticales très hautes, et réunies à leur partie supérieure par un bloc de fer, ce qui renforce beaucoup l'électro-aimant, qui est excité par une dérivation du courant de la machine. Les machines Edison sont surtout utilisables pour l'éclairage; celle construite pour l'éclairage de l'Opéra, à

Paris, développe à la vitesse de 350 tours par minute un courant de 800 ampères sous 125 volts.

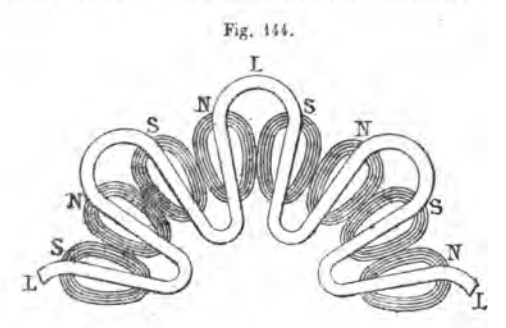
La machine *Thomson-Houston* permet de donner une solution simple de la distribution électrique en série, car l'intensité du courant qu'elle produit est à peu près indépendante du nombre des appareils récepteurs alimentés, et même de la vitesse de rotation de la machine. Les courants qu'elle produit ont besoin d'être redressés.

650. Machines à pôles. On donne ce nom aux machines dont l'induit est composé d'une ou de plusieurs bobines à noyau de fer doux. Chaque noyau présente des pôles à chacune de ses deux extrémités, lorsqu'il est alimenté par le courant. Lorsqu'il y a plusieurs bobines, elles sont disposées sur une circonférence, soit perpendiculairement, soit parallèlement à l'axe; les balais sont dans le plan des inducteurs. Les principales machines à pôles sont celles de *Gérard*, de *Lontin*, etc.

651. Machines à disque. On a classé sous la rubrique de machines à disque celles dont le fil induit est enroulé de manière à constituer une série de rayons dont l'ensemble forme un disque, lequel tourne entre deux couronnes d'inducteurs. Ces derniers agissent uniquement sur les parties radiales du fil induit.

La machine Ferranti-Thomson ne possède aucune pièce en fer dans son armature. Cette dernière est constituée par un ruban de cuivre de 36 mètres de long sur $0^{m},02$ de large et $0^{m},002$ d'épaisseur; elle tourne devant 16 électro-aimants S, N, de forme ovoïde (*fig.* 144). L'absence du fer permet d'augmenter beaucoup la vitesse de rotation de l'armature, qui peut faire jusqu'à 2000 tours à la minute. La résistance de cette armature est presque nulle, puisqu'elle n'atteint pas 3/100 d'ohm. Une de ces machines, avec 1000 tours par minute, développe 104 volts, débite 2000 ampères, et peut alimenter 5000 lampes à incandescence Swan (661) de 16 bougies.

Fig. 144.



652. Installation des machines électriques. La plupart peuvent être employées indifféremment dans la majorité des cas, mais chaque système doit être pris dans le modèle construit spécialement pour l'emploi auquel on le destine : éclairage, galvanoplastie, transport de la force, etc. La vitesse et les dimensions se règlent sur les conditions de l'installation et les besoins présumés. En France, les machines Gramme et Édison sont les plus répandues. D'après Siemens, le rendement en électricité des dynamos bien établies atteint 0,90, et le rendement en lumière du courant produit peut atteindre le même chiffre.

Les machines électriques doivent être placées en un endroit sec, afin

d'empêcher les pertes d'électricité; elles ne doivent pas être installées à proximité d'explosifs ou de poussières inflammables. On doit veiller à la propreté de tous leurs organes.

Les machines courantes marchent à des vitesses de 700 à 1500 tours par minute.

Les forces électromotrices élevées sont l'occasion de grandes difficultés; les vitesses doivent être très grandes, l'isolement absolu; les fils sont sujets à l'échauffement, et leur contact est dangereux. On doit s'arranger pour ne pas dépasser 100 à 200 volts, mesurés aux bornes de la machine. Pour des transmissions de force on a été jusqu'à 3000 volts.

Dans une machine, *la force électromotrice induite est proportionnelle à l'intensité du champ magnétique; elle est proportionnelle à la longueur du fil des bobines induites, et elle augmente avec la vitesse de rotation.*

La résistance intérieure croît avec le nombre de tours du fil induit.

L'inconvénient caractéristique des machines électriques c'est qu'un moteur initial est nécessaire pour les faire fonctionner. Là où il y a une machine à vapeur, les dynamos sont très pratiques; là où il n'y en a pas, leur installation est très coûteuse, car il faut alors se procurer une machine à vapeur *ad hoc.* Dans la petite industrie et chez les particuliers les piles, et surtout les accumulateurs (629), peuvent les remplacer dans une certaine mesure.

653. Self-induction. La self-induction ou extra-courant est l'action qu'exerce un courant sur lui-même, ou, plus exactement, l'action d'une partie d'un courant sur une autre partie du même courant. Cette action, qui se traduit, suivant les cas, par une augmentation ou une diminution de la force du courant, est sensible, surtout lorsqu'un conducteur est enroulé plusieurs fois sur lui-même. Les résultats des extra-courants sont, le plus souvent, nuisibles aux machines.

654. Transformateurs. Les courants produits par une usine centrale peuvent être de différentes qualités et, par suite, employés pour des usages fort différents. Aussi, voit-on la difficulté pour une usine de produire des courants de qualités diverses réclamées par les consommateurs; mais cette difficulté est aujourd'hui résolue par l'emploi des *transformateurs*, appareils qu'on intercale entre l'usine productive et les appareils qui doivent consommer le fluide produit, de façon à le transformer ou à l'adapter au but proposé. Les transformateurs reçoivent l'énergie électrique et la restituent après en avoir modifié la force électromotrice et l'intensité, sans changer leur produit, qui représente le travail ou la puissance électrique reçue ($T = EI$) (613).

Le premier transformateur est dû à un Français, *Gaulard.* L'appareil que Gaulard imagina, avec *Gibbs*, est constitué par une bobine d'induction formée de deux circuits distincts, enroulés l'un autour de l'autre. Le circuit primaire ou inducteur est parcouru par des courants alternatifs envoyés de la station centrale; ces courants induisent le circuit secondaire, sur lequel sont greffés les appareils où le fluide doit

être utilisé (lampes, etc.), et y développent d'autres courants alternatifs. L'intensité et la force électromotrice de ces derniers dépendent, pour un courant primaire d'énergie connue, des dimensions relatives des deux circuits de la bobine, et peuvent, par suite, prendre les valeurs que l'on désire. D'autres transformateurs ont été imaginés par MM. Zipernowsky, Déri et Blathy, etc.

655. Transport de la force par l'électricité. Les machines électriques sont *réversibles*, c'est-à-dire qu'elles peuvent transformer indifféremment le travail mécanique en électricité ou l'électricité en travail. Aussi, lorsqu'on introduit un courant dans une dynamo par les frotteurs, cette machine se met à tourner et peut servir de moteur (expérience de M. Hippolyte Fontaine, en 1873, à l'Exposition de Vienne).

Pour rendre la chose pratique, on associe deux dynamos réunies par un conducteur. L'une, nommée *génératrice*, est mue par un moteur quelconque et envoie le courant produit à l'autre dynamo, nommée *réceptrice*, qui est le moteur secondaire, et qui peut commander, par sa courroie, une transmission quelconque. La rotation des deux machines a lieu en sens contraires; elle est indépendante du sens du courant.

La distance entre les deux machines peut être très grande, de sorte que, par ce moyen, on peut transmettre le travail à grande distance.

Lorsque le régime est établi, l'intensité I du courant est donnée par la formule :

$$I = \frac{E - E'}{R + R' + r}.$$

$E - E'$, différence des forces électromotrices des deux machines;
R, résistance de la machine génératrice;
R', résistance de la machine réceptrice;
r, résistance des conducteurs.

L'intensité ne dépend que de la résistance à vaincre; elle est indépendante des forces électromotrices : car si celle de la génératrice augmente, celle de la réceptrice progresse parallèlement.

Le travail de la réceptrice est (en kilogrammètres) :

$$\frac{E' I}{9,81}.$$

Le maximum a lieu quand $E' = \frac{E}{2}$; il est donc de 50 p. 100; mais, dans la pratique, les rendements ne vont guère au delà de 30 à 40 p. 100. Il y a donc une perte sensible de travail en transmettant ce dernier par l'électricité; néanmoins, ce système est applicable dans un grand nombre de cas, comme par exemple pour transporter, sans danger, l'énergie là où l'installation d'un moteur serait difficile ou impossible, ou, *vice versa*, pour faire pénétrer, dans une usine, le travail produit par un moteur utilisant sur place une force naturelle ou autre qu'on ne peut déplacer, placé à grande distance ou dans une région inaccessible.

L'avenir réserve une grande importance à la découverte de Fontaine; déjà, des expériences entreprises en France par M. Marcel Deprez (de 1882 à 1886) ont donné des résultats appréciables. Dans les dernières expériences, faites entre Creil et la gare de la Chapelle, à Paris (distance 56 kilomètres), le rendement a été de 45 p. 100; mais la pierre d'achoppement, au point de vue pratique, de ce système, est dans la dépense qu'il occasionne. La dernière expérience de Creil (1885-86) a exigé 124880 francs (50000 francs pour la génératrice, 30000 pour la réceptrice, 44880 pour la ligne); c'est beaucoup trop pour encourager, dans les conditions actuelles, l'application du procédé. Il demande encore à être grandement amélioré.

656. Éclairage électrique. *Unités de lumière* (671). Au Congrès des électriciens de Paris (1881), l'*unité internationale* choisie a été l'*intensité de lumière émise par 1 centimètre cube de platine élevé à la température de fusion.* On la nomme *Violle;* elle vaut 2 carcels. 1 *carcel* équivaut environ à l'intensité de 8 bougies *Étoile.*

En France, on compte en carcels pour les lampes à *arcs* et en bougies pour les lampes à *incandescence.*

Le *carcel-huile* brûle 42 grammes d'huile de colza épurée par heure. Le *carcel-gaz* consomme 140 litres à l'heure. Le *carcel-bougies* use 93gr,5 par heure pour les 8 bougies *Étoile* allumées ensemble (soit 11gr,7 de stéarine par chaque bougie).

En Angleterre, on compte par *candle*, valant 0,879 bougie française. En Allemagne, on compte par *kerze* de 0,855 bougie française.

Le Congrès des électriciens de Paris, en 1889, a défini la *bougie* comme étant 1/20 de l'étalon Violle, et par conséquent 1/10 de carcel.

Historique. Sans remonter trop haut, au XVIIe siècle : Otto de Guerike, le Dr Wall, puis Hawksbee; au XVIIIe : Grey, constatèrent divers phénomènes électriques lumineux. Watson (1746), puis Humphry Davy (1813), purent s'éclairer en faisant jaillir des étincelles entre des conducteurs électriques. Mais ce n'est qu'en 1841 que MM. Deleuil et Archereau firent à Paris des expériences publiques, où la lumière était produite entre deux charbons, dans un ballon où l'on avait fait le vide, au moyen d'éléments Bunsen. En 1844, nouvelle expérience de M. Foucault. En 1846 eut lieu la première application de la nouvelle lumière au théâtre. Il faut encore citer les essais de M. Staites, à Londres (1848), de MM. Lacassagne et Thiers, à Lyon (1855); de M. Serrin, à Paris (1861). En 1878 on voit apparaître la bougie *Jablochkoff*, qui fut d'abord installée avec succès pour l'éclairage de l'avenue de l'Opéra et de la place du Théâtre-Français, à Paris. Depuis nous avons eu de nombreuses applications de l'éclairage électrique, un grand nombre de voies publiques des grandes villes du monde entier l'ont utilisé, et les systèmes se sont multipliés.

La lumière électrique peut être produite par quatre procédés : l'*arc voltaïque*, l'*incandescence à air libre*, les *bougies électriques*, et enfin les *lampes à incandescence dans le vide.*

657. Arc voltaïque. Les lampes à arc voltaïque sont basées sur le principe que la lumière jaillit entre deux charbons légèrement éloignés et reliés chacun à l'un des pôles d'une source électrique (1).

(1) Dans la pratique, ce n'est guère l'arc lui-même qui éclaire, mais la lumière produite par l'incandescence des charbons.

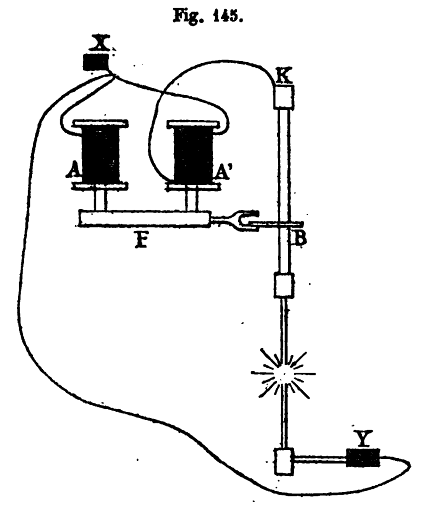
La traînée lumineuse, qui est très blanche et intense, est constituée par des particules incandescentes qui se détachent des charbons, et qui établissent la continuité du courant entre ces deux charbons. Les charbons employés sont une pâte composée de charbon de cornue, pulvérisé et aggloméré avec du goudron. Le diamètre des crayons de charbon fait varier l'intensité du courant. Un crayon de 2 millimètres donne de 2 à 3 ampères; un crayon de 10 millimètres donne de 11 à 15 ampères, etc.

Pour une source donnée d'électricité, il existe un maximum d'écartement entre les crayons qu'on ne peut dépasser. Les deux charbons doivent être d'abord amenés en contact l'un de l'autre pour que le courant s'établisse, puis éloignés afin que l'arc se forme. Lorsque les courants sont continus, le charbon positif se taille en cratère, s'use, et deux fois plus vite que le charbon négatif, qui se taille en pointe. Comme l'usure des deux charbons est inégale et que leur écartement normal est la condition indispensable d'une bonne lumière, on est arrivé à réaliser cet écartement normal par l'adjonction de dispositifs automatiques appelés *régulateurs*.

658. Régulateurs. Dans le régulateur *Serrin*, qui date de 1859, le charbon positif est porté par une crémaillère qui, agissant par son poids sur une série d'engrenages, sert de moteur, et tend à rapprocher les deux crayons. Ces engrenages sont calculés de façon que le point lumineux reste fixe; dans ce but, le charbon positif, qui s'use deux fois plus vite que l'autre, descend d'une quantité double de celle dont le charbon négatif remonte. Un électro-aimant, par suite d'une ingénieuse disposition, règle tout le système.

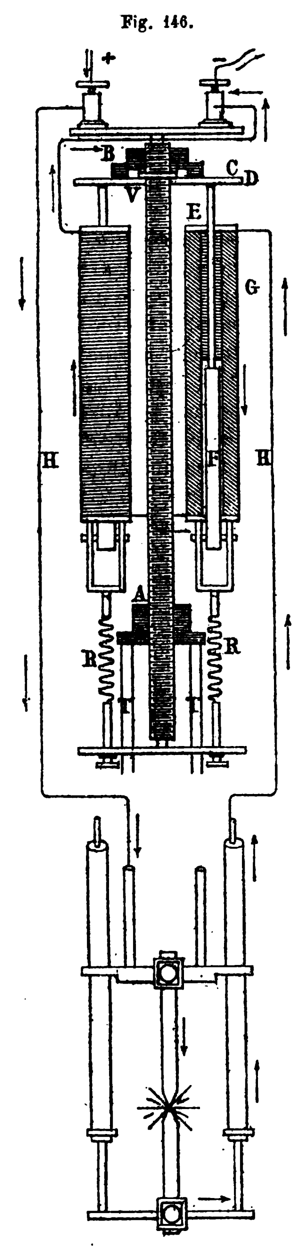
Dans le régulateur *Gramme*, le charbon supérieur est seul mobile et la tige qui le soutient entraîne, à l'aide d'une crémaillère, une série de rouages, dont le dernier, mobile, porte une étoile d'encliquetage. L'électro-aimant à fil fin commande une armature chargée d'embrayer cette étoile. Elle porte un interrupteur qui coupe le courant de dérivation chaque fois que l'armature a été attirée et a dégagé une branche de l'étoile. L'action du ressort antagoniste est ainsi plus facile, et l'armature forme une espèce de trembleur qui ne laisse défiler l'encliquetage que dent par dent. Un électro-aimant à gros fil, placé tout en haut de l'appareil, soulève à l'aide de son armature le cadre qui supporte le charbon inférieur, toutes les fois qu'il faut produire l'écart de rallumage.

Fig. 145.



Le régulateur *Brush* (*fig.* 145) rentre dans la catégorie des *lampes différentielles*. Deux bobines AA' sont entourées par un courant qui,

Fig. 146.



partant de X, entre en K dans le charbon supérieur; les mêmes bobines sont parcourues, mais en sens contraire du premier, par un courant dérivé, de fil fin, qui relie directement X et Y (cette dérivation n'est pas figurée sur notre dessin). Une bague métallique B, commandée par la tige de fer doux F, commandée elle-même par l'électro-aimant AA', règle la descente ou l'arrêt du charbon supérieur par le rapport des résistance des deux fils.

Régulateur Cance (*fig.* 146). Sur une vis V peut courir un écrou A, appelé *écrou-moteur*, et qui supporte le charbon supérieur. Cet écrou tendrait à descendre par son poids; mais comme il ne peut tourner, puisqu'il est relié aux deux tringles TT, c'est la vis qui tourne de gauche à droite. Un second écrou B, appelé *écrou-régulateur*, est engagé au sommet de la vis V; il repose sur un plateau C, calé sur la vis, et qui limite la descente de cet écrou, qui est entraîné dans le même sens de rotation que la vis. Un plateau annulaire D, muni de deux bras et placé à peu de distance de l'écrou-régulateur B, repose par l'extrémité de ses bras sur deux tiges de cuivre E, passant chacune au travers d'un cylindre de fer doux G, fixé dans la bobine H. Les tiges E sont reliées à deux noyaux de fer doux F, mobiles dans les bobines. Quand le courant ne circule pas, la pesanteur détermine le contact des deux charbons. Lorsqu'on établit le courant, ce dernier passe d'abord par les charbons, puis par les bobines H; aussitôt, les noyaux de fer doux F s'élèvent, entraînent avec eux le plateau D, et la surface de ce plateau vient adhérer à celle de l'écrou régulateur B. Les noyaux F et le plateau D continuant à s'élever, il arrive un moment où l'écrou B ne pouvant plus tourner, puisqu'il fait corps avec le plateau D, c'est la vis V qui tourne de droite à gauche. Ce mouvement détermine l'ascension de l'écrou-moteur A, les charbons s'écartent un peu

et l'arc voltaïque se forme : autrement dit, l'allumage se produit. A mesure que les charbons s'usent, leur écartement augmente, et l'allongement de l'arc, qui en est la conséquence, augmente la résistance opposée au passage du courant électrique; mais la disposition du régulateur permet de parer à cet inconvénient : l'intensité du courant circulant dans la lampe et dans les bobines diminuant, les noyaux mobiles F, ayant alors une puissance magnétique attractive plus faible, descendent, sollicités par leur propre poids et surtout par les ressorts antagonistes R; de même, le disque D et l'écrou-régulateur B descendent simultanément, et ce mouvement ne cesse que quand le disque D et l'écrou B ont une adhérence trop faible pour résister à l'action de la pesanteur déterminée par l'écrou-moteur A qui, en descendant, rapproche provisoirement les deux charbons. A mesure qu'une nouvelle usure des charbons se produit, les mêmes mouvements se reproduisent et tendent à maintenir entre les charbons un écartement normal constant, jusqu'à ce que ces derniers soient usés.

Le régulateur *dynamo*, très robuste, consiste en un petit moteur électrique Gramme (648) placé dans la partie supérieure, formant cage, du régulateur. Sur l'arbre de l'anneau est monté un pignon engrenant avec une crémaillère, qui supporte le charbon supérieur, qui est seul mobile. La crémaillère tend, par son poids, à faire tourner l'anneau dans un certain sens, qui est justement le contraire de celui dans lequel l'anneau tend à tourner quand le courant passe. La position d'équilibre du système correspond à l'écart normal des charbons; cette position est celle pour laquelle l'effort statique développé par l'anneau magnétique est égal au poids de la crémaillère.

L'arc voltaïque convient, à cause de sa puissance, pour l'éclairage des larges espaces, ou pour envoyer un faisceau de lumière à de grandes distances. Les charbons ne durant que quelques heures, il faut souvent les renouveler.

On compte une puissance de lumière d'environ 100 à 200 carcels par cheval-vapeur avec de bons régulateurs.

659. Incandescence à air libre. On a vu les difficultés que présente la régularisation de l'arc voltaïque; aussi a-t-on songé à le supprimer ou,du moins, à le réduire à l'infiniment petit, en faisant buter les deux charbons l'un contre l'autre, de telle sorte que la lumière fût produite exclusivement par l'incandescence des deux et parfois d'un seul. Ce fait se produit quand on met en contact deux charbons de diamètres différents; alors le plus mince seul se consume. Néanmoins, ces systèmes sont plus encombrants que les régulateurs, plus coûteux, et donnent une lumière moins belle; l'intensité lumineuse y est souvent inégale, à cause des ruptures du charbon qui surviennent fréquemment. Cependant la lampe Reynier-Werdermann (1878) a donné de bons résultats. On compte environ 30 carcels par cheval avec ces systèmes.

660. Bougies électriques. Les premiers régulateurs étaient très coûteux et très compliqués; leur application semblait difficile. C'est alors qu'un Russe, M. *Jablochkoff*, imagina une disposition nouvelle,

qui sembla l'emporter sur tous les autres systèmes. Aujourd'hui, il est encore le plus pratique pour l'éclairage des usines et lorsque la force motrice est à bon marché. Les bougies électriques Jablochkoff utilisent les courants *alternatifs*, avec lesquels l'usure des deux charbons est la même et qui donne lieu, de la part de chaque pointe, à l'émission d'une même quantité de lumière. Les crayons de charbon, au lieu d'être bout à bout, sont côte à côte, et séparés par une matière isolante (*colombin*); c'est une couche de kaolin ou un mélange de deux parties de sulfate de chaux et d'une partie de sulfate de baryte. Ce mélange se volatilise au fur et à mesure que les charbons brûlent, ce qui permet à la bougie de se consumer lentement et sans mécanisme. Les charbons s'usent donc parallèlement.

Les bougies électriques ayant une courte durée, on a imaginé des chandeliers à plusieurs bougies, placées dans des pinces à ressort, dont les branches sont isolées l'une de l'autre et communiquent avec les fils du circuit; quand une bougie est consumée, un commutateur permet de lui en substituer une autre.

Les bougies électriques ont l'inconvénient de donner une lumière vacillante. Un cheval-vapeur peut donner de 40 à 60 carcels avec les bougies électriques.

La lampe *soleil*, système mixte, est une lampe dans laquelle l'arc se produit au fond d'une cavité creusée dans un bloc de marbre ou de magnésie. Ce bloc se porte à l'incandescence et augmente considérablement l'effet produit. La lumière est jaune et régulière.

661. Lampes à incandescence dans le vide. L'électricité, en traversant des corps bons conducteurs, élève leur température quand ils sont conducteurs insuffisants, ou quand ils sont trop minces et l'électricité très intense; souvent les fils sont rougis et même volatilisés par suite de cette insuffisance de conductibilité, sur un certain espace du circuit. Les lampes à incandescence sont dérivées de cette propriété, et si, dans un circuit métallique, on intercale des fils fins de charbon, ces derniers, par le passage du courant, sont rendus incandescents, et peuvent, par conséquent, éclairer. Mais cette intensité lumineuse, provenant d'un échauffement considérable, si elle se produit dans un milieu comburant, amène promptement la destruction du charbon au contact de l'oxygène de l'air. Pour remédier à cet inconvénient, qui détruit tout l'effet qu'on veut produire, puisqu'il rompt le circuit, on enferme hermétiquement le filament de charbon dans une enveloppe de verre où l'on a fait le vide, ou dans un milieu non comburant, comme l'azote ou des vapeurs de gazoline. Le charbon étant à l'abri des attaques de l'oxygène, il peut être porté à l'incandescence sans se consumer. Les lampes à incandescence peuvent durer alors de 500 à 1 000 heures; elles finissent par une désorganisation moléculaire, causée par le passage du courant dans les filaments de charbon,

Le degré d'incandescence d'une lampe est le quotient des intensités (relatives à la carcel) des radiations de longueur d'onde $\lambda = 582$, et des radiations de longueur d'onde $\lambda = 657$.

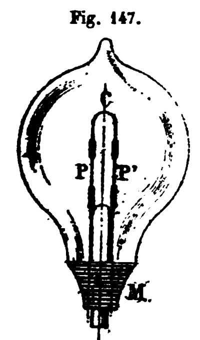
Avec les systèmes précédents, on n'arrivait à produire que de gros foyers. Au contraire, les lampes à incandescence offrent l'avantage de permettre de répartir la lumière en un grand nombre de petits foyers, mais il ne faut pas aller trop loin dans cette divisibilité, car elle entraîne une perte de travail, puisqu'on n'obtient à égalité de force motrice initiale que 1/6 de l'intensité lumineuse que fournirait un arc voltaïque.

Dès 1844, MM. Deleuil et Archereau produisaient l'arc voltaïque dans un vase clos, purgé d'air pour ralentir la combustion. En 1873, M. Lodyguine (Russe) reprenait cette idée. Édison, enfin, imagina d'abord, vers 1879, une lampe avec un fil de platine poussé à l'incandescence dans le vide, puis remplaça ensuite le platine par le charbon.

M. Swan inventa sa lampe vers la même époque.

La lampe Édison (*fig.* 147) est constituée par un charbon spécial C, obtenu en carbonisant une espèce de bambou du Japon et ayant la forme d'un U. Ce charbon, très mince, de fabrication délicate, est enfermé dans une ampoule A de verre mince, avec laquelle il est soudé, et qui sert d'enveloppe à la lampe. On fait le vide dans cette ampoule au moyen d'une pompe de Sprengel, après quoi la lampe est soudée au chalumeau, et lutée avec du plâtre dans un manchon de cuivre M fileté extérieurement, afin de pouvoir être vissé. Des fils de platine PP', servant de support au charbon C et soudés avec lui, sont mis en relation, l'un avec le manchon de cuivre M, l'autre avec une rondelle de cuivre scellée au milieu du plâtre, à la base de la lampe. Pour installer cette lampe, on la visse dans une douille en bois présentant deux pièces de cuivre qu'on met respectivement en contact avec le manchon de la rondelle, et auxquelles aboutissent les deux conducteurs qui amènent le courant. Dès que le courant passe, le charbon devient incandescent et projette une vive lumière jaunâtre.

Fig. 147.



Dans la lampe Swan, le charbon est fait en tresse de coton plongée dans l'acide sulfurique étendu d'eau, et on lui donne la forme d'un fer à cheval ou d'une spirale. Afin d'éviter les rentrées d'air dans le globe de verre, par suite des différences de dilatation aux points de soudure des conducteurs en platine, on les recouvre de verre sur presque toute leur longueur.

Dans la lampe Maxim, les charbons sont faits avec du carton de papier bristol, carbonisé à l'abri de l'air, comme les charbons Édison et Swan. Dans la lampe A. Gérard, le filament est fabriqué directement avec de la poussière de charbon agglomérée par un système particulier. Ces lampes peuvent être alimentées par des courants continus ou par des courants alternatifs. Les lampes Édison, Swan et Maxim marchent à 100 ou 110 volts, la lampe Gérard à des tensions variant entre 20 et 35 volts, selon sa puissance. On compte de 8 à 10 carcels par cheval-vapeur avec ces lampes.

662. Installations de l'éclairage électrique. Les lampes à incandes-

cence et les régulateurs sont les moyens les plus employés pour produire la lumière électrique.

Les lampes peuvent être différemment disposées sur un circuit; on les met, soit en dérivation ou en quantité, soit en série ou en tension. Dans le premier cas, chaque lampe est alimentée par un branchement issu du circuit général; la force électromotrice est constante, et les intensités de chaque lampe s'ajoutent. Dans la seconde condition, le courant traverse successivement toutes les lampes; l'intensité est constante et égale à celle d'un foyer; la force électromotrice, au contraire, est égale à la somme des forces électromotrices de chaque foyer.

Ces différences s'expliquent par la similitude avec les accouplements de piles (630), et en supposant des lampes à la place des piles et le fil parcouru par un courant produit par une machine électrique.

Pour les *phares* où l'on recherche un seul foyer, mais d'une grande intensité, on a recours aux régulateurs (lampes à arc). Quand on doit diviser la lumière, on doit employer de préférence les lampes à incandescence. Cependant, les régulateurs et les bougies Jablochkoff peuvent aussi faire cet office, quoique moins avantageusement, et à cause du peu de fixité de leur lumière. Qu'on n'oublie pas que la lumière coûte d'autant plus cher qu'elle est plus divisée. Où les régulateurs conviennent bien, c'est pour l'éclairage des grands espaces, tels que gares de chemins de fer, chantiers, rues, etc.; mais un atelier, une petite salle seront infiniment mieux éclairés par des lampes Édison, Swan ou Maxim.

Pour un atelier, une lampe à arc de 8 ampères d'intensité suffit à l'éclairage de 200 à 300 mètres carrés. On doit éviter l'éclairage par une seule lampe, car les ombres sont trop brusques, et, par suite, plus gênantes.

Lampes à arcs : Type n° 1. 30 carcels (240 bougies anciennes) remplacent 8 lampes de 8 bougies, 50 watts × 10 amp. = 500 watts.

Type n° 1 *bis*. 70 × 4 = 280 watts.

Type n° 2. 80 carcels (640 bougies anciennes) remplacent 21 lampes de 8 bougies, 70 watts × 6 amp. = 420 watts.

Type n° 3. 150 carcels (1200 bougies anciennes), 70 × 12 = 840 watts.

Lampes à incandescence (d'après G. de Coëtlogon).

VOLTAGES usuels.	1/2 CARCEL (4 bougies anciennes) 20 watts.	1 CARCEL (8 bougies anciennes) 30 watts.	1 CARCEL 1/2 (12 bougies anciennes) 45 watts.	2 CARCELS (16 bougies anciennes) 60 watts.	4 CARCELS (32 bougies anciennes) 120 watts.
volts	ampères	ampères	ampères	ampères	ampères
10	2	3	»	»	»
15	1,4	2	»	»	»
20	»	1,5	2,25	3	6
25	»	1,2	1,8	2,4	4,8
30	»	1	1,5	2	4
40	»	0,75	1,125	1,5	3
50	»	0,6	0,9	1,2	2,4
60	»	0,5	0,75	1	2

Pour avoir un bon éclairage et des lampes de quelque durée (500 heures au minimum), il ne faut pas les prendre en dessous de 10 à 15 volts, et les *voltages* les plus courants sont de : 20, 25, 30, 40, 50, 60 et 100 volts. Toutes les lampes exigent, à peu près, la même énergie électrique, soit 3,5 à 4 watts par bougies, ce qui fait environ 30 watts pour une lampe de 1 carcel (8 bougies anciennes).

La plus grosse lampe du monde. A l'exposition navale de Londres de 1891, il y avait une lampe électrique colossale, construite par l'Amirauté. Elle était placée dans un modèle de phare d'une hauteur de 36 mètres, et son intensité lumineuse est de 5 millions de bougies, soit 100 fois plus que le feu de la tour Eiffel. Si le feu de cette lampe monstre ne rencontrait aucun obstacle, on pourrait l'apercevoir à 203 kilomètres par un temps clair, mais à condition que la terre ne fût pas ronde; car on ne voit le feu de la tour Eiffel qu'à 70 kilomètres.

663. Prix de revient de l'éclairage électrique. Dans le cas où l'on a une chute d'eau, c'est-à-dire où la force motrice ne coûte rien, on peut employer cette chute pour actionner le moteur électrique destiné lui-même à faire naître la lumière. Mais ce n'est qu'un cas exceptionnel; aussi faut-il absolument une machine à vapeur, un moteur à gaz, des accumulateurs ou toute autre force initiale, mais non gratuite.

Les *dépenses de premier établissement* comprennent généralement l'achat d'une machine à vapeur, avec ses fondations et sa chaudière, la machine dynamo, les conducteurs, les foyers lumineux et l'appareillage. Les *frais d'entretien* consistent en combustible, graissage et main-d'œuvre.

Prenons un exemple courant, donné par MM. E. Cadiat et L. Dubost, dans leur *Traité d'électricité*, et supposons qu'on ait à installer 200 lampes Édison de 16 bougies sur deux circuits présentant chacun une longueur totale, aller et retour, de 400 mètres. Ces lampes exigent 100 volts et $0^{amp},7$, et sont placées en dérivation, de telle sorte que la dynamo devra donner une intensité de 140 ampères. En comptant sur 8 lampes par cheval, il faudra une machine à vapeur de 25 chevaux, qui, mise en place, avec la chaudière, reviendra à 17000 francs.

La dynamo coûtera 3000 francs, et, comme il faudra en avoir une de rechange, cela fait 6000 francs. Les appareils du tableau de distribution : commutateur, interrupteurs, voltmètre, ampèremètre, coupe-circuits, régulateur du champ magnétique, représenteront 450 francs environ.

La section à donner à la canalisation en fil de cuivre devra être de 50 millimètres carrés environ, et son prix, étant de $3^{f},38$ le mètre, fera un total de $3,38 \times 800 = 2700$ fr. pour les deux circuits.

Les conducteurs des dérivations qui demandent, dans le cas actuel, des fils de 2 millimètres carrés, et qui atteignent 2000 mètres de longueur, coûteront $2000 \times 0,29 = 580$ francs.

Enfin, l'appareillage de chaque lampe peut être estimé à 20 francs, soit 20×200 lampes $= 4000$ francs. En ajoutant 270 francs d'imprévus, on arrive à un total de 32900 francs comme prix d'installation.

Les frais d'entretien, si l'éclairage est supposé fonctionner 4 heures par jour durant 300 jours par an (soit 1200 heures par an), peuvent s'évaluer ainsi :

Combustible et graissage	2100 fr.
Renouvellement des lampes	1200
Main-d'œuvre	1600
Intérêt, 5 pour 100	1600
Amortissement, 10 pour 100	3200
Imprévus	300
Total	10000 fr.

La *lampe-heure* revient ainsi au prix d'entretien de :

$$\frac{10000}{1200 \times 200} = 0^{fr},0416.$$

Avec le gaz, la dépense serait beaucoup plus considérable. Elle serait, en effet, pour l'entretien (le prix du gaz à Paris étant de $0^{fr},30$ le mètre cube) :

Gaz consommé	20160 fr.
Main-d'œuvre	1200
Intérêt, 5 pour 100	500
Amortissement, 10 pour 100	1000
Imprévus	240
Total	23000 fr.

Mais les frais de premier établissement sont bien moins importants pour le gaz que pour l'éclairage électrique. Dans le cas que nous avons choisi, il ne serait que de 10000 francs, soit trois fois moins que celui de l'électricité.

L'éclairage électrique commence donc par entraîner à de plus grandes dépenses que l'installation du gaz; mais au bout de peu d'années la différence se trouve souvent renversée à l'avantage du premier système; on a vu cependant des cas contraires.

Conditions d'abonnement à l'éclairage électrique à Paris. Une décision du préfet de police, du 22 février 1889, a approuvé la police d'abonnement suivante, qui est celle de la compagnie continentale Édison (station centrale Drouot) :

Art. 1er. — La compagnie fournit le courant électrique dans toutes les rues où, en vertu de sa concession, elle a ou est tenue d'avoir des conducteurs, à tout consommateur qui contractera un abonnement de *trois ans au moins* et garantira une consommation moyenne annuelle de 300 *ampères-heure* par lampe de 10 bougies ou en proportion, en se conformant d'ailleurs aux dispositions des règlements concernant la pose des appareils, ainsi qu'aux stipulations de la présente police agréée par l'administration municipale.

Elle fournit également de la *force motrice* à tout consommateur qui garantira une consommation minima annuelle de 600 heures pour la totalité de la force installée.

Art. 2. — La compagnie fournit le courant électrique devant la demeure du consommateur, qui en prend livraison au moyen d'un branchement sur la conduite principale. L'installation de ce branchement et tous travaux et fournitures quelconques depuis la naissance du branchement sont à la charge de l'abonné aux prix d'un tarif approuvé par l'administration. L'installation du branchement et les travaux jusqu'au compteur seront, dans tous les cas, faits par la compagnie, et l'abonné est tenu d'en verser le montant au moment de la signature de la police.

Tout le surplus des travaux et fournitures, à partir du compteur, pourront être faits par des entrepreneurs choisis par l'abonné. Si l'abonné préfère charger la compagnie de ces travaux, le prix en sera discuté de gré à gré. Il en sera de même de l'entretien.

Dans aucun cas la compagnie ne pourra être rendue responsable des appareils installés, qu'ils l'aient été par la compagnie ou par d'autres; la conservation ou l'entretien seront toujours à la charge de l'abonné.

La compagnie concessionnaire pourra se refuser à fournir du courant électrique à tout abonné dont l'installation serait reconnue défectueuse par l'administration, soit dès le début, soit par suite de modifications apportées par l'abonné.

Art. 3. — Le courant électrique sera livré au compteur. En conséquence, l'abonné fera établir, chez lui et à ses frais, un ou plusieurs compteurs de son choix, mais seulement de l'un des systèmes adoptés par l'administration. La pose ou le plombage du ou des compteurs seront faits par la compagnie aux frais de l'abonné, de même que la fourniture et le scellement de la plate-forme. Le ou les compteurs seront proportionnés à la consommation maxima d'électricité de l'abonné. Le compteur sera toujours soumis, quant à son exactitude et à la régularité de sa marche, à toutes les vérifications que l'administration municipale ou la compagnie jugeraient utiles.

En cas d'arrêt du compteur, la moyenne constatée pour les dix jours antérieurs servira de base pour la période d'arrêt. Le compteur donnera la mesure de la consommation en *ampères-heure* sous une tension déterminée.

Il est formellement interdit à l'abonné d'apporter aucune modification dans les organes du compteur et de ses accessoires et dans sa position. L'abonné devra fournir les emplacements nécessaires pour le ou les compteurs ou transformateurs (654), s'il en est fait usage. Il devra laisser libre accès aux agents de la compagnie pour en opérer la visite dans l'endroit ou ils seront placés; tout refus à cet égard sera poursuivi par les voies de droit. Les emplacements devront être d'un facile accès et choisis de manière que le chiffre de consommation puisse être exactement relevé.

Art. 4. — La compagnie sera tenue de fournir en location des compteurs d'un des systèmes agréés par l'administration à ceux des abonnés qui lui en feront la demande.

Le prix mensuel de location du compteur, fixé par le tableau ci-après, sera exigible en même temps que le prix du courant électrique :

Calibre du compteur.	Prix mensuel de location et d'entretien.
5 ampères	2fr,50
10 —	4 ,00
20 —	5 ,00
40 —	6 ,00
100 —	10 ,00

Au-dessus de 100 ampères, la location du compteur sera l'objet de conventions spéciales. Moyennant cette rétribution, la compagnie restera chargée de la pose, de l'entretien et des réparations du compteur.

Art. 5. — L'abonné aura la libre disposition du courant électrique qui aura passé par le compteur. Il pourra, à son gré, allumer ou éteindre tout ou partie des foyers. Aucun changement ne pourra être apporté par l'abonné à la disposition intérieure de son éclairage sans une déclaration préalable faite à la compagnie, et il ne devra être procédé aux modifications qu'après qu'elle lui aura délivré reçu de cette déclaration. En cas de contravention à la présente stipulation, la compagnie aura le droit de cesser la fourniture du courant électrique, sous réserve de tels dommages-intérêts que de raison.

Art. 6. — Le prix du courant électrique livré pour l'*éclairage* sera de 0f,045 par carcel-heure.

Le tarif pourra être établi en watts-heure, sur la demande de l'abonné, à raison de 0f,15 les 100 watts-heure (1). Les 100 watts-heure, 1 ampère-heure sous une tension de 100 volts, produisent 3,4 carcels d'éclairage.

(1) D'après M. Ch Haubtmann (*Société des Ingénieurs civils*, 5 juin 1891), l'énergie électrique coûte, à Paris, trois fois plus que celle produite par un moteur à gaz. Le Havre fait payer le courant 0fr,08 l'hectowatt; c'est la ville où l'énergie électrique est la moins chère en France.

Le prix du courant livré pour la *force* sera de 0f,45 par cheval électrique fourni.

Art. 7. — Le prix de l'abonnement est payable par mois et d'avance au domicile où le courant électrique est livré; en conséquence, il sera payé d'avance à la compagnie, par abonné, à titre de garantie, une somme de :

7fr,00 par lampe à incandescence;
30 ,00 par lampe à arc;
30 ,00 par cheval électrique installé.

La somme payée d'avance sera remboursée par la compagnie à l'abonné à l'expiration de l'abonnement, sous déduction de la valeur de l'électricité fournie par elle et autres frais qui n'auraient pas été soldés.

. . . .

Art. 8. — Dans le cas où quelque accident de force majeure obligerait la compagnie à interrompre momentanément la fourniture de l'électricité, la compagnie ne sera tenue à aucune indemnité autre que le remboursement du prix du courant électrique payé d'avance et qui n'aurait pas été fourni.

. . . .

Éclairage de Paris. L'éclairage électrique avait été installé provisoirement sur diverses voies de Paris depuis 1888. Le conseil municipal a accordé, en 1891, une concession de 10 ans aux diverses sociétés qui exploitent cet éclairage. Le prix convenu est de 0f,57 par lampe-heure à arc de 15 ampères, et de 0f,40 par lampe-heure de 10 ampères. L'éclairage au gaz de cette partie de la voie publique revenait à 121 000 francs par an; car le gaz n'était payé que 0f,15 le mètre cube. L'éclairage électrique coûtera plus cher, 348 000 francs; mais la quantité de lumière sera cinq fois plus considérable en certains points et dix fois plus grande dans d'autres.

664. Moteurs électriques. Nous avons vu (655) que l'électricité peut être transformée en travail par suite de la propriété de réversibilité que possèdent les dynamos. Mais on peut opérer cette transformation plus simplement à l'aide d'un moteur unique et construit *ad hoc*. Celui de Bourbouze se compose de deux couples de bobines d'électro-aimants; par une disposition particulière, ces bobines sont traversées successivement par un courant et elles attirent tour à tour, par l'aimantation de leurs barreaux, deux tiges de fer doux articulées qui commandent un balancier. Ce dernier se relève chaque fois que le courant traverse les premières bobines, et s'abaisse lorsque le courant pénètre dans les bobines placées à l'arrière. Ce balancier porte à son extrémité une bielle qui commande un volant. La pile qui fournit l'électricité est enfermée dans le bâti du moteur; elle communique avec un appareil qui distribue successivement le courant à l'un ou à l'autre électro.

665. Paratonnerres (1). Le paratonnerre remplit un double rôle, soit comme appareil conducteur de la foudre lorsqu'elle tombe, soit comme appareil préventif agissant d'une manière permanente pour soutirer l'électricité des nuages à mesure qu'elle s'y forme et lui donner un écoulement facile.

Zone de protection. La règle de Gay-Lussac consiste à dire qu'*une*

(1) D'après une étude de notre ami L. Dorbigny, publiée dans la *Semaine des Constructeurs* (volume 7).

tige de paratonnerre protège un cône dont le rayon de base est égal à la hauteur même du cône; mais l'instruction de la commission chargée d'étudier l'établissement des paratonnerres (20 mai 1875) indique une règle qui consiste à prendre le rayon du cône égal à sa hauteur, plus les trois quarts de cette hauteur, c'est-à-dire à la hauteur multipliée par 1m,75. D'après cela : Pour une hauteur de 1 mètre, le rayon de base serait 1m,75; pour 5 mètres, 8m,75; pour 10 mètres, 17m,50. Le cône préservateur s'étend au delà de sa base sur la toiture et se prolonge jusqu'au sol; il protège par conséquent tout ce qui peut être compris sous ce cône prolongé. L'action protectrice d'un paratonnerre augmente avec l'élévation du point que l'on veut protéger; le paratonnerre est donc d'autant plus préservateur qu'il est plus rapproché des nuages.

On ne dépasse guère 10 mètres pour la hauteur d'un paratonnerre, qui protège ainsi autour de lui un cône ayant au moins 10 mètres de rayon; mais, pour des étendues plus grandes, il vaut mieux placer plusieurs paratonnerres en leur donnant une hauteur moindre. Il y a une très grande difficulté pour les rendre solidaires avec les charpentes, et pour les hauteurs un peu grandes les oscillations de ces tiges sont une cause de destruction des charpentes. Ainsi, l'idée de protéger une très grande étendue par un seul paratonnerre rencontrerait des difficultés d'exécution et ne donnerait aucune économie.

Construction. Le paratonnerre se fait toujours en fer forgé de section carrée, circulaire et même polygonale, en s'amincissant de la base au sommet. Il faut, autant que possible, le choisir galvanisé, mais il ne faut jamais l'enduire de peinture qui conduit mal l'électricité. Ordinairement, les pointes se font en platine, mais la commission admet que de simples flèches en cuivre de 0m,50 de longueur réunies solidement à la tige de fer sont suffisantes. La condition importante est la liaison continue et intime de la tige avec le conducteur jusqu'au point où le fluide trouve un écoulement libre pour se réunir à la terre, le réservoir commun.

Pour réunir le paratonnerre aux diverses parties de la construction, on fait usage d'un *circuit des faîtes* ou conducteur métallique qui règne sans interruption sur les faîtages de toutes les parties des édifices à protéger. Il est relié métalliquement à toutes les tiges de paratonnerres et au conducteur, et, par suite, à la nappe d'eau qui facilite l'écoulement de l'électricité. Le circuit des faîtes doit être formé de barres de fer carrées de 2 centimètres de côté, ayant 4 ou 5 mètres de longueur; ces barres doivent être jointes l'une à l'autre par superposition aux extrémités avec des boulons et une soudure à l'étain.

Câbles et supports. Lorsque le paratonnerre est solidaire avec la charpente, il reste à le prolonger par un conducteur qui vienne aboutir soit à un puits, soit à une région souterraine humide où le fluide électrique puisse s'écouler.

La jonction du conducteur et du paratonnerre se fait toujours extérieurement par rapport aux bâtiments protégés. Une disposition très employée consiste à placer, à quelques décimètres de la toiture et au

bas de la tige du paratonnerre, un collier en fer, de 0^{m},05 de hauteur environ, formé de deux parties, qui embrasse à la fois la tige du paratonnerre et le conducteur. Le serrage se fait au moyen de boulons.

Suivant les chemins sinueux que parcourt le conducteur, il faut le soutenir en un certain nombre de points. Ces supports varient en raison des cas spéciaux.

Mise en terre du conducteur ou câble. Dans les instructions de la commission, il est dit : « A l'extrémité du conducteur, doit être fixée une masse métallique, plaque ou cylindre creux, à surface aussi large que possible. Cette masse doit plonger d'au moins un mètre dans la nappe d'eau souterraine. » Des regards doivent être établis pour permettre le nettoiement des pièces souterraines. Le conducteur ne doit jamais être en contact immédiat avec le sol, dont l'humidité le rongerait peu à peu. Souvent on le fait traverser un auget en briques, placé à 0^{m},50 au-dessous du sol, que l'on remplit d'un mélange de coke et de braise. Le conducteur, ainsi protégé, pénètre dans le puits et se termine par un *perd-fluide* galvanisé, auquel on donne diverses formes, soit celle de tige à racines, soit de perd-fluide à griffes, appelé grappin, ou encore la forme d'une grille proprement dite présentant des pointes.

« Toutes les pièces métalliques de masse un peu considérable, entrant dans la construction des édifices, seront reliées métalliquement aux systèmes de paratonnerres. »

Dépenses d'installation. Pour un seul paratonnerre et un conducteur de 30 mètres, on peut compter approximativement :

Tige de paratonnerre de 6 mètres de haut	200 francs.
Flèche en bronze de 0^{m},50 surmontée d'une olive en platine	35 à 50
Collier en fer galvanisé ou prise de courant	12
Câble en cuivre rouge de 12 à 20 millimètres de diamètre (30 mètres de long), de 4 à 8 francs le mètre	120 à 240
Perd-fluide à branches (15 fr.) ou à grappin (35 fr.), de	15 à 35
Supports	60 à 100
Total	442 à 625 fr.

Il faut ajouter la pose et l'installation du puits, qui peut dépasser les chiffres précédents. En résumé, au minimum, il faut compter 1000 fr. pour un seul paratonnerre. Mais, pour un édifice en exigeant plusieurs, il y a des dépenses communes relatives au conducteur descendant et au puits.

LUMIÈRE. SON. PROJECTILES DE GUERRE

666. Lumière. La radiation de la lumière est rectiligne, et sa vitesse a été trouvée, par Foucault, de 300000 kilomètres par seconde. C'est la même que celle de l'électricité (617). Pour une même source, l'intensité de la lumière diminue dans le rapport inverse des surfaces des sections du cône de la lumière, c'est-à-dire en raison inverse du carré de la distance.

667. Vitesse du son. Dans l'air à la température de 16°, le Bureau des longitudes a trouvé que la vitesse du son était de 340^{m},88 par seconde. Cette vitesse décroît avec la température; à 10° elle est de 337 mètres, et à 0° de 333 mètres. D'après des expériences de Colladon sur le lac de Genève, la vitesse du son dans l'eau à 9° est de 1435 mètres par seconde. La vitesse du son dans l'air étant représentée par 1, elle est 10,5 dans la fonte d'après Biot, et d'après Chladni elle est 7,5 dans l'étain, 9 dans l'argent, 12 dans le cuivre rouge, 10,67 dans le laiton, 16,67 dans le fer, l'acier et le verre, 10,67 dans le chêne, 12,50 dans le hêtre, 14,40 dans le charme et l'orme, 15 dans le tilleul, 16 dans le saule et le pin, 18 dans le sapin.

668. Canons. Depuis 1874, le bronze a été abandonné comme métal à canon, en France, et remplacé par l'acier. On utilise néanmoins les anciens canons en bronze.

Canons de campagne employés par les principaux États
(d'après le 2e supplément du *Dictionnaire Larousse*).

PUISSANCES.	ANNÉE de l'adoption.	CALIBRE en millim.	POIDS du projectile en kilog.	VITESSE initiale en mètres.	NOMBRE de coups portés par l'avant-train.	POIDS de la pièce avant-train chargé.	POIDS par cheval.	LIMITES de la hausse.	LIMITES des tables de tir.
		millim.	kilog.	mèt.		kilog.	kilog.		
France. . . .	1877	90	7,095	455	30	2100	350	5500	7200
(Canons de Bange).	1877	80	5,605	490	32	1595	266	5500	7000
Allemagne. .	1873	88	6,8	444	33	1965	323	4200	7000
	1873	78,5	5,07	465	39	1800	300	4000	6800
Angleterre. .	1883	86	9,98	542	28	2100	350	»	»
	1883	76	5,76	522	38	1936	322	»	»
Autriche. . .	1873	87	6,4	448	34	1917	319	4550	»
	1875	75	4,31	423	40	1553	258	4550	»
Italie.	1876	87	6,1	476	34	1928	321	4000	»
	1874	75	4,25	421	48	1285	321	3600	»
Russie. . . .	1877	87	6,872	447	30	1847	246	»	»
	1877	87	6,872	411	20	1476	246	»	»
	1877	106,7	12,734	373	18	2100	350	»	»

669. Armes portatives. La plupart des États européens ont adopté le *fusil à répétition* de *petit calibre*. Les *balles*, qui ont de 3 à 4 calibres de longueur, ont leur noyau en plomb entouré d'une chemise en maillechort pour la France et la Belgique, en cuivre pour l'Italie, en acier pour l'Angleterre et l'Autriche, en acier nickelé pour l'Allemagne. En France et en Autriche on emploie la *poudre sans fumée*.

Les armes à magasin sont employées en France, Portugal, Turquie, Norvège, Autriche, Allemagne, Italie, Hollande, Angleterre, Belgique, Suisse et Danemark; elles varient peu de dimensions, suivant les pays.

Le *calibre* du fusil français Tramond-Lebel (modèle 1886) est de 8 millimètres; son *magasin* renferme 8 *cartouches;* le *poids du fusil* vide est

de $4^{kg},18$ (le fusil allemand modèle 1888 est le plus léger : $3^{kg},80$); le *poids d'une cartouche* est de 29 grammes ($27^{gr},5$ dans le fusil allemand); le *poids du projectile*, 15 grammes; la *longueur du projectile :* 32 millimètres; sa *vitesse initiale* en mètres : à 610 mètres (620 dans le fusil allemand); le *poids de la baïonnette* : $0^{kg},4$; le poids de la charge de poudre $2^{gr},7$; le nombre de cartouches portées par l'homme : 112 (150 pour le fusil allemand).

Les armes se chargeant coup par coup sont employées encore en Espagne, Roumanie, Russie, Suède et Serbie. La vitesse initiale la plus grande est atteinte dans le Remington transformé employé en Suède : 600 mètres. Le poids de ces fusils, avec baïonnette, varie de $4^{kg},71$ à $4^{kg},4$.

La poudre du fusil français Lebel, due à M. Vieille, ne produit qu'une faible détonation. La balle atteint un fantassin debout jusqu'à 520 mètres, un fantassin à genoux jusqu'à 420. Jusqu'à 600 mètres, la trajectoire ne s'élève pas à plus de $2^{m},30$ au-dessus du sol, tandis que la balle du fusil Gras (modèle 1874) montait à $5^{m},95$. A 300 mètres, le projectile traverse un bloc de bois de 1 mètre d'épaisseur; à 1000 mètres, il traverse deux chevaux ou quatre hommes. A 2000 mètres, sa force vive est la même que celle du fusil Gras à 1000 mètres, c'est-à-dire deux fois la force de pénétration de la balle du revolver d'ordonnance tiré à bout portant. Après la traversée de trois poutres de sapin de chacune $0^{m},22$ d'épaisseur, ce projectile frappe la cible à 600 mètres sans déviation. Ce fusil peut tirer 5000 coups sans être encrassé.

ÉCLAIRAGE

670. Éclairage. Matières employées à l'éclairage. Les matières solides employées à l'éclairage sont : 1° les branches de *bois résineux*, employées dans quelques contrées peu civilisées ; 2° les *chandelles*, qui se fabriquent avec le *suif* provenant du bœuf, du bouc, du mouton; 3° les *bougies* proprement dites, qui se font avec la *cire* d'abeilles, et celles fabriquées avec le *blanc de baleine* et les acides margarique et stéarique.

Les *huiles*, grasses, siccatives et essentielles, sont les liquides employés à l'éclairage. Les huiles grasses sont les seules que la pratique ait généralement adoptées; les huiles siccatives ne peuvent être employées à cause de leur durcissement à l'air, et les huiles volatiles ne brûlent qu'avec fumée et dégagent une odeur désagréable. Depuis plusieurs années, l'application des huiles de schiste et de *pétrole* (673) à l'éclairage a pris une grande extension. Parmi les huiles grasses, les plus employées sont celles d'olive, de colza, de navette et d'œillette ou pavot.

Le *gaz* utilisé pour l'éclairage, depuis les travaux de Ph. Lebon, Murdoch, Windsor, Clegg, Pelouze, etc., s'extrait de la houille, des résines, des acides gras de toute nature, et de presque toutes les matières organiques, puisqu'elles donnent par la distillation des carbures d'hydrogène gazeux, principe essentiel du gaz d'éclairage.

Éclairage électrique (voir n° 656 et suivants).

D'après M. Hippolyte Fontaine, voici les quantités de lumière consommées par habitant, en 1855 et en 1889, à Paris, évaluées en bougies décimales (1/10 de carcel-heure) :

ANNÉES.	BOUGIES et chandelles.	HUILES végétales.	HUILES minérales.	GAZ.	ÉLECTRICITÉ	TOTAUX.
1855	220	1174	»	2376	»	3765
1889	190	517	1995	6470	2130	11302

671. Unité de lumière. Pouvoirs éclairants des différentes matières. Péclet a adopté, comme type de lumière, celle fournie par une lampe Carcel dépensant 42 grammes d'huile à l'heure. Les Anglais ont adopté celle de la bougie de spermaceti (blanc de baleine) de 6 à la livre, brûlant $8^{gr},207$ à l'heure. En France, on adopte souvent celle de la bougie stéarique dite de l'Étoile (voir n° 656 les mesures de la lumière électrique).

M. Penot a constaté que la bougie de 5 à la livre brûlait $9^{gr},60$ par heure. Quand on néglige de la moucher, elle peut perdre de la lumière dans le rapport de 1 à 0,88. Aussi recommande-t-on de maintenir la mèche dans le même état, à une hauteur de $0^{m},01$ environ.

D'après M. Penot, la bougie anglaise de blanc de baleine (candle) équivaut aux 0,9 environ de la bougie française stéarique.

L'unité allemande (kerze) est la bougie de paraffine de 20 millimètres de diamètre, brûlant avec une flamme de $0^{m},50$ de haut; elle vaut 0,855 bougie française.

D'après Péclet, une lampe Carcel brûlant 42^{gr} d'huile à l'heure équivaut à 7 bougies; ce qui donne pour l'équivalent de 100^{gr} d'huile $\frac{700}{42} = 16,67$.

Mais en 1889 il a été décidé que la *bougie* théorique $= \frac{1}{10}$ de Carcel $= \frac{1}{20}$ de l'étalon Violle (656).

D'après M. Penot, un quinquet brûlant $31^{gr},94$ équivaut à 6,15 bougies, et une lampe modérateur brûlant $28^{gr},60$ à 6,21 bougies; ce qui donne, pour l'équivalent de 100^{gr} d'huile, 19,25 pour le quinquet et 21,71 pour la lampe à modérateur. Ces derniers chiffres, comparés à celui de la lampe Carcel, indiquent une grande supériorité des petites lampes sur les grandes.

D'après *Kelly* et C. F. *Chandler*, le pouvoir éclairant d'une lampe à pétrole à mèche plate de $9^{mm},5$ est égal à celui de 9 bougies de blanc de baleine brûlant $7^{gr},8$ par heure, et le coût moyen par heure d'une lumière égale à celle de 8 bougies de blanc de baleine est de $0^{f},88$ avec le blanc de baleine et de $0^{f},014$ avec le pétrole rectifié.

La comparaison des pouvoirs éclairants se fait au moyen d'un *photomètre* (Rumford, Foucault, Bunsen, Weber, Mascart), en exprimant que les intensités varient en raison inverse du carré des distances des sources lumineuses. Un bec de 1re série (ville de Paris), brûlant 100 lit. de gaz à l'heure, produit une intensité de lumière équivalant aux 0,77 de celle de la lampe Carcel brûlant 42 gr., et par conséquent équivalente à celle de $0,77 \times 7 = 5,39$ bougies; un bec de la 2e série, brû-

lant 140 lit., produit une intensité de 1,10 fois celle de la lampe Carcel, et équivaut à $1,10 \times 7 = 7,70$ bougies; enfin un bec de 3e série, brûlant 200 lit., produit une intensité de 1,72 fois celle de la lampe Carcel, et équivaut à $1,72 \times 7 = 12,04$ bougies. En prenant les équivalents pour 100 lit. de gaz brûlés à l'heure, on trouve $\frac{5,39 \times 100}{100} = 5,39$ pour le *titre* du bec de la 1re série, $\frac{7,70 \times 100}{140} = 5,5$ pour celui de la 2e, et $\frac{12,04 \times 100}{200} = 6,00$ pour celui de la 3e; ce qui montre que les gros becs sont les plus avantageux. Mais on a dépassé grandement aujourd'hui tous ces rendements.

Les nouvelles *lampes intensives* au gaz (679), Siemens, Wenham, etc., produisent maintenant le carcel avec une consommation de 50, 40 et même seulement de 35 et 28 litres à l'heure. Un bec du 4 septembre modifié donne 80 carcels pour une dépense horaire de 4500 litres et le nouveau bec industriel Bengel frères donne 150 carcels pour 5000 litres par heure.

Tableau des diverses natures d'éclairage produisant la lumière d'une bougie Étoile (ancienne unité de lumière). (De l'éclairage au gaz, *par M. D'Hurcourt.*)

NATURE de l'éclairage.	EXPLICATION.	MATIÈRE brûlée en 1 heure.	PRIX de la matière.	VALEUR de l'unité de lumière.
Bougie stéarique dite *de l'Etoile*.	1 livre de bougie (485 gr.) donne 50 heures d'éclairage.	9g,60	1f,60 la liv.	centimes. 3,07
Chandelle. . . .	A poids égal, elle donne autant de lumière que la bougie (M. Penot).	9g,60	0f,90 la liv.	1,73
Huile.	*Lampe carcel* de 42 gr., lumière de 7 bougies, (42 gr. à 1f,60 le kil. 6c,72, mèche et entretien 0c,40, total 7c,12). Soit pour l'unité de lumière.	6g,00	1f,60 le kil.	1,02
	Lampe modérateur dépensant 28 gr., lumière 6boug,20 (28 gr. à 1f,60 le kil. 4c,48, mèche et entretien 0 ,40, total 4c,88). Soit pour l'unité de lumière.	4g,51	1f,60 le kil.	0,79
Gaz de houille. .	*Bec d'Argant*, dit Benghel, sans panier, dépense 105 litres, lumière de 7 bougies. Pour l'unité de lumière.	15 lit.	0f,30 le m.	0,45
	Bec fendu. Largeur de la fente 0m,0006, pression 0m,007, dépense 138 litres, lumière de 7 bougies. Pour l'unité de lumière (expérience).	19l,7	0f,30 le m.	0,59
	Usine à gaz de Mulhouse, *titre* 6,28 (M. Penot).	15l,92	0f,30 le m.	0,48
Gaz de boghead.	Expérience de Mulhouse, titre de 28,20. . . .	3 ,53	1 ,20 le m.	0,42
Gaz portatif. . .	Titre de 25.	4 ,00	*id.*	0,48
	Id. de 30.	3 ,33	*id.*	0,40
	Mixtures grasses, titre de 40.	2 ,50	*id.*	0,30
Gaz hydrogène. .	Titre maximum 5,22.	19 ,1	0f,30 le m.	0,57

Les becs Wenham les plus perfectionnés ne demandant que 5 litres de gaz environ, en une heure, pour produire l'intensité d'une bougie Étoile, la valeur de l'ancienne unité de lumière revient ainsi avec eux à $5 \times 0^f,0003 = 0^{cent},15$ seulement. Le bec Auer, qui ne demande que 3 litres 1/2 environ, la donne donc pour $3,5 \times 0^f,0003 = 0^{cent},105$.

672. Éclairage à l'huile. Dès 1831, Fennings proposait d'appliquer à l'éclairage un mélange d'alcool et de térébenthine. Ce liquide produit une lumière vive, presque sans odeur; mais il offre des dangers d'explosion. Les huiles végétales sont nombreuses; mais on les falsifie aisément. L'huile de noix est fétide et porte à la tête. A New-York, on emploie l'huile de ricin épurée, qui donne une belle lumière. L'huile de fusain présente les mêmes avantages; 10 litres de graines de fusain donnent un litre d'huile. On connaît l'huile d'œillette, etc. On obtiendrait un très bel éclairage en mélangeant l'huile de pomme de terre avec des huiles minérales.

Quant aux huiles minérales servant à l'éclairage, on en distingue trois : l'huile de résine, l'huile de schiste et l'huile de pétrole. On obtient l'huile de résine en distillant la colophane à feu nu; cette huile donne considérablement de noir de fumée; son gaz d'éclairage est très brillant. En Amérique, on a employé le goudron. On a obtenu une belle lumière de certaines houilles, à l'aide d'un bain de plomb et par l'intermédiaire d'un courant de vapeur qui traverse l'appareil. On a donné à cette huile le nom de *bokool.*

L'huile de schiste est très employée : certaines de ces huiles répandent une odeur infecte. Le schiste d'Écosse ne contient pas de goudron, mais quelques traces de matières résineuses. Le schiste de Dorshire donne 22 p. 100 d'huile; celui d'Écosse 56, et 47 quand il est rectifié. Ce produit s'enflamme de lui-même; c'est un sérieux danger. En mélangeant des huiles de colza et de schiste, on évite le danger et l'on obtient une lumière satisfaisante.

Il est d'autres modes d'éclairage qu'on n'obtient pas à meilleur compte, qui ne donnent pas plus de lumière, et qui présentent plus de dangers : ainsi l'huile-gaz, extraite du goudron de houille; le gaz liquide, courant d'air arrivant sur un gaz hydrocarburé, etc.

673. Éclairage au pétrole. L'usage de l'huile de pétrole s'est rapidement répandu en France depuis une trentaine d'années. L'huile de pétrole du Canada est celle dont l'odeur est la plus infecte, la seule qui présente vraiment du danger pour la santé. L'huile pure et rectifiée est blanche, d'une consistance un peu plus forte que celle de l'eau, et répand une odeur particulière. Jeter de l'eau sur de l'huile de pétrole enflammée, ce serait accroître l'incendie. On étouffe ce feu par du sable, par des cendres ou par une compression quelconque.

Le Dr Constantin Paul résume ainsi son opinion sur le pétrole :

L'huile minérale de pétrole n'est pas insalubre, malgré sa mauvaise odeur; elle n'offre de danger que par sa facilité à s'enflammer; l'huile de pétrole *rectifiée* est moins inflammable que l'huile brute, et l'on peut y jeter des allumettes enflammées sans qu'elle prenne feu; l'huile purifiée est en même temps plus claire et plus limpide que l'huile brute. Le pétrole doit être conservé dans des bidons en métal.

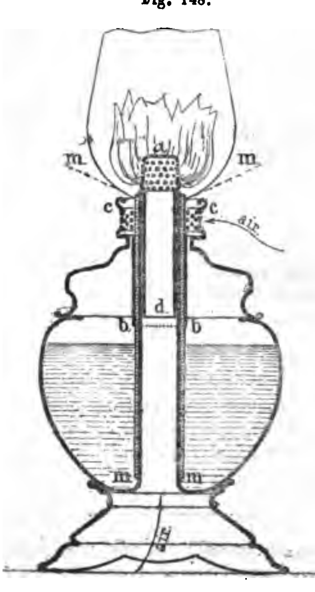
La lampe, dans la partie qui contient l'huile, doit être large et peu profonde, pour donner un éclairage régulier; quand on veut remplir ces lampes, il est préférable de le faire de jour; si on le fait le soir, il ne faut pas approcher, de l'huile qu'on verse, la flamme d'un objet d'éclairage, sans cela on courrait risque d'y mettre le feu; quand on veut éteindre une lampe, on baisse la mèche, et quand il ne reste plus qu'une pe-

tite flamme bleue, on souffle. Il est dangereux de continuer à faire descendre la mèche; si elle tombait dans la lampe, elle pourrait y mettre le feu et déterminer l'explosion. (Voir une étude sur l'industrie du pétrole dans le *Génie civil*, t. XVI, n° 5, novembre 1889.)

On va chercher le pétrole, au moyen de puits forés au trépan, jusque dans les « poches » où il est enfermé et on l'amène à la surface au moyen de pompes, lorsqu'il ne jaillit pas de lui-même, à la manière des eaux d'un puits artésien. Le pétrole est reçu dans de grands réservoirs, d'où il est amené, par des tuyaux qui mesurent parfois plusieurs myriamètres, jusqu'aux centres industriels où on le distille. Le pétrole brut est loin d'être homogène; sa consistance est souvent celle d'une mélasse claire. Il est brun foncé, et vert par réflexion. Il pèse de 0,78 à 0,92. La distillation de l'huile brute donne d'abord l'*éther de pétrole* (de 45 à 70 degrés) qui pèse 0,65, puis l'*essence de pétrole*, dont la densité varie de 0,702 à 0,740 et qui est connue sous le nom de *naphte* ou d'*essence minérale* (de 75 à 120 degrés). Au-dessus de 150 à 280 degrés, on recueille l'huile d'éclairage (le *kérosène* ou *photogène*), qui n'est d'ailleurs employé qu'après un raffinage spécial (pétrole rectifié). Les huiles lourdes et les paraffines viennent ensuite.

Les lampes alimentées au pétrole présentent des dispositions spéciales, en raison même de la volatilité du combustible. Les huiles végétales, comme le colza, exigent une température élevée pour se décomposer en produits volatils. Aussi doit-on les amener presqu'au contact de la flamme pour les « faire brûler » : dans les lampes à huile, la mèche plonge constamment dans le liquide amené jusqu'au bord du bec à l'aide d'un piston, dépasse ce bord de quelques millimètres à peine, et pénètre immédiatement dans la flamme. Dans les lampes à pétrole, entre la flamme et la surface du liquide, il doit y avoir environ 6 centimètres, la mèche ne dépasse jamais le bec ou du moins n'arrive pas jusqu'à la flamme. Cette disposition évite une volatilisation trop rapide du liquide, qui s'élève par capillarité le long de la mèche; on la complète en refroidissant le brûleur par un courant d'air appelé par la combustion même.

Fig. 148.



La mèche, pincée entre les deux tubes concentriques *a* et *b* (*fig.* 148), plonge dans le liquide combustible, qui est renfermé à l'intérieur d'un réservoir hermétiquement clos. Un premier appel d'air se fait par la partie inférieure du tube *a*. Cet air vient d'abord refroidir le pétrole enfermé dans

le réservoir et active ensuite la combustion des produits volatils en pénétrant dans la flamme par les trous du chapeau *d*. Une couronne *c*, également percée de trous, donne accès à un deuxième afflux d'air, mais celui-là extérieur à la flamme.

Depuis quelques années, on utilise la vapeur du pétrole dans des appareils appelés *carburateurs*, qui produisent, d'une manière continue, la vaporisation du pétrole et mélangent les vapeurs hydrocarburées à la quantité d'oxygène nécessaire à leur combustion. Pour arriver à ce résultat, on fait passer un courant d'air, sous pression, soit à travers le liquide hydrocarburé (barbotage), soit à la surface de celui-ci, en augmentant autant que possible les surfaces de contact. Parfois, on vaporise le liquide à chaud avant d'introduire l'air nécessaire dans l'appareil. Le mélange d'air et de vapeurs ainsi obtenu (*gaz atmosphérique*) est reçu dans un régulateur de pression et transmis aux divers brûleurs par une canalisation en plomb. Les carburateurs occupent peu de place. On peut les disposer soit sous un petit hangar à proximité du local à éclairer, soit dans des caves. Les carburateurs sont basés sur l'emploi de la *benzoline*, *gazoline* ou *pétrole léger*, qui s'obtient dans les premières fractions de la distillation des pétroles et qui se vaporise à peu près à froid, chose essentielle. Les gazolines du commerce pèsent environ 650 grammes le litre. Les principaux appareils de ce genre sont ceux de MM. Lothammer, Jaunez, A. Parrot, décrits dans la *Semaine des Constructeurs* (vol. 14, p. 125).

674. **Gisements pétrolifères.** Nous indiquons ci-après les principaux gisements de pétrole, avec leur importance évaluée en barils de 42 gallons, soit de 180 litres :

États-Unis (1) : 25000 puits (surtout en Pennsylvanie, Oil-Creck), production en 1861 : 2113600 barils; en 1881 (apogée) : 29674500 barils; en 1888 : 16128000 barils.

Canada : Environ 200 puits, 900000 barils par an.

Pérou : Exploitations récentes, 300000 barils par an.

Bolivie, *République Argentine*, *Vénézuéla*, *Trinité*, *Indes néerlandaises*, *Indes anglaises*, *Nouvelle-Zélande :* Pas d'exploitations régulières.

Australie : Exploitations récentes, environ 80000 barils.

Japon : 2000 puits, 34000 barils par an.

Perse, *Chine et Formose :* Production inconnue.

Birmanie : Production annuelle, 1000000 de barils.

Région transcaspienne : 1 puits; production annuelle, 116250 barils.

Roumanie : 1200 puits; production annuelle, 125000 barils.

Galicie (*Autriche*) *:* Production annuelle, 5000000 de barils.

Allemagne : Environ 200 puits; 300000 barils par an.

Italie : Production insignifiante.

France : Exploitations régulières à peine commencées.

Bakou et Apchéron (*Caucase*) *:* 600 puits creusés; 150 exploités; 459 irrégulièrement exploités à cause de leur faible rendement. Production du naphte en 1888 : 16500000 barils, 165000000 de pouds (1 poud = 16 kilog.), 44000000 de pouds de produits distillés ou raffinés; 20000 pouds de kir; nombre d'ouvriers employés : 4000.

Caucase (Bakou excepté) : 259 puits; 50000 barils.

---

(1) Aux États-Unis, les pétroles bruts sont envoyés directement des puits aux raffineries et aux magasins d'expédition par des canalisations spéciales ou *pipe-lines*, dont l'administration centralise la production dans la région pétrolifère comprise entre l'Atlantique et la région des lacs.

En France, le pétrole brut est payé 18 francs par quintal à la douane et le pétrole raffiné, 25 francs.

675. Le lucigène, mélange intime d'air et d'huile à l'état d'extrême division, donne une flamme fixe, très claire et très brillante. Le mélange s'effectue au moyen d'un mécanisme empruntant son mouvement à un petit réservoir d'air comprimé. Il suffit de tourner un robinet pour régler la flamme. Le prix de revient varie de 1/10 à 1/12 du prix de l'éclairage au gaz. Le lucigène se prête surtout à l'éclairage de vastes espaces. Plusieurs kilomètres carrés peuvent être éclairés par un seul fanal. La flamme ne donne pas seulement une lumière blanche puissante; elle produit, de plus, une très grande diffusion. La flamme d'un lucigène de 3000 bougies s'étend sur une surface de $0^{mq},184$, tandis que la surface rayonnante de 6 lampes à arc voltaïque ayant le même pouvoir éclairant total n'est que de $0^{mq},000525$, c'est-à-dire 350 fois moindre.

676. Éclairage au gaz. La flamme du gaz de l'éclairage est d'autant plus brillante que la densité du gaz est plus grande et que la température de l'air d'alimentation et par suite de la flamme est plus élevée. La densité du gaz de la houille étant 0,529 en moyenne, et celle du gaz de l'huile 0,960, le pouvoir éclairant du premier étant 100, celui du second a été 272.

Le gaz provenant de la distillation de l'huile a pour densité 1,054 au moment de sa préparation, et suivant qu'on le consomme à cet instant, ou deux ou quatre jours après, il faut brûler par heure 506 ou 544 ou 607 centimètres cubes pour obtenir la lumière d'une chandelle de 6 au 1/2 kilog. Pour le gaz de la houille, ces nombres sont respectivement 1012, 1087 et 1161 centimètres cubes.

La *puissance calorifique* d'un mètre cube de gaz est de 6000 calories (726).

677. Densité du gaz. La densité du gaz varie avec sa composition. On admet généralement le chiffre de 0,55 par rapport à l'air se justifiant comme suit :

Composition moyenne, en volume et en poids.

Formène, méthane ou gaz des marais (C^2H^4)........	60^{lit}	pesant	28^{gr}	et renfermant	21^{gr} de carbone	pour	7^{gr} d'hydrogène.
Éthylène ou gaz oléfiant (C^4H^4).	8	—	10 ,16	—	8 ,70	—	1 ,46 d'hydrog.
Hydrogène (H)........	20	—	1 ,78	—	1 ,78 d'hydrogène.		
AzCO et divers........	12	—	15 ,01	—	6 ,28 d'azote	pour	3,76 de carbone et 4,97 d'oxygène.

Soit en tout, en gaz d'éclairage, 100^{lit} pesant $54^{gr},95$

D'où 1 mètre cube de gaz pèse $549^{gr},5$.

678. Becs de gaz. La combustion d'un corps n'est que sa combinaison avec l'oxygène de l'air, et un gaz est d'autant plus éclairant qu'il est plus riche en carbone. Dans les débits faibles, le peu de gaz qui s'écoule est entouré d'une grande surface d'air; les becs brûlent à bleu. Une addition de 6 p. 100 d'air dans une flamme diminue le pouvoir éclairant de près de moitié (p. 849); avec 20 p. 100 d'air, on n'a plus de lumière. Si l'on augmente le débit du bec, le centre de la flamme

échappe à l'action directe de l'air, et l'on obtient une belle lumière blanche. Si l'on exagère le débit, la flamme devient bleuâtre et le pouvoir éclairant est mal utilisé. Les brûleurs à fente large sont donc supérieurs à ceux à fente mince.

Le pouvoir éclairant maximum du gaz coïncide avec les faibles pressions au bec et avec la section d'écoulement la plus grande pour un débit donné. Examinons les principaux becs employés :

Becs papillons ou chauves-souris. Le bec papillon est un bouton sphérique creux en acier de 6 millimètres de diamètre traversé par une fente régulière pratiquée à la scie, d'où le gaz s'écoule en produisant une flamme en *éventail.* La fente peut avoir de 2/10 à 7/10 de millimètre de largeur.

La sphère est réunie à un pas de vis par une petite gorge. Ce bec consomme 120 litres de gaz à l'heure pour produire un carcel d'intensité. L'augmentation du débit fait varier la largeur, mais non la hauteur de la flamme.

Il est excellent pour l'éclairage public et particulier à l'air libre. Ces becs sont vissés dans un petit tube en cuivre soudé à la conduite.

Becs bougies. Dans ce système, le bouton métallique est percé d'un trou circulaire dans son axe. La flamme est comparable à celle d'une bougie. On l'emploie dans les lustres, appliques, girandoles, etc. Les diamètres varient de 5/10 de millimètre à $3^{mm}1/2$. Le pouvoir éclairant croît plus vite que la consommation. Le meilleur bec est celui de 2 millimètres de diamètre qui dépense 34 litres à l'heure, et dont la flamme est haute de $0^{m},10$.

Bec Manchester. Ce bec est formé d'un cylindre terminé à la partie supérieure par un disque percé de deux trous inclinés, de telle sorte que les jets gazeux se rencontrent et forment en s'aplatissant une flamme allongée analogue à une queue de poisson. C'est, en quelque sorte, la réunion de deux becs bougies. On l'emploie pour l'éclairage extérieur à l'air libre et quelquefois dans de grandes pièces où les becs sont nombreux. La supériorité du bec Manchester sur le bec à deux bougies augmente à mesure que le diamètre des trous grandit. Ces becs ont une utilisation supérieure à celle des becs bougies et inférieure à celle des becs papillons. La forme plus allongée de leur flamme évite le bris des globes de verre. Ils font entendre un sifflement particulier lorsque la consommation dépasse la limite de bonne utilisation.

Becs d'Argand, à double courant d'air. Ces becs sont composés d'une couronne circulaire en métal, porcelaine ou stéatite, percée de trous circulaires, espacés de 3 millimètres de centre en centre et dont le nombre varie. La couronne est entourée d'une galerie métallique sur laquelle repose une cheminée en verre. L'air arrive au bec par des ouvertures ménagées dans la galerie, ainsi que par le panier placé à la partie inférieure. Ce panier en métal, porcelaine ou verre régularise l'arrivée du courant d'air qui circule autour de la flamme, augmente le pouvoir éclairant de 3 p. 100, et il pénètre à l'intérieur par l'axe du

bec. Ce bec donne une lumière constante et s'emploie pour l'éclairage intérieur. Sa flamme offre plus de fixité que celle des becs précédents. La bonne utilisation du pouvoir éclairant varie avec le diamètre des trous, le nombre de ces trous, la distribution de l'air et la hauteur de la cheminée de verre. On peut assimiler ces becs à la réunion d'un certain nombre de becs bougies.

Les expériences faites sur les becs à 30 trous ont permis de constater que le pouvoir éclairant maximum correspond au diamètre des trous de 6/10 à 8/10 de millimètre pour une dépense de 100 à 110 litres à l'heure. On peut employer des becs dont le diamètre des trous atteint 1 millimètre, mais en faisant usage du cône de métal qui active la combustion en dirigeant l'air sur la flamme. Il faut multiplier les trous autant que possible: car s'ils sont trop eloignés, l'air peut s'introduire dans les intervalles compris entre les jets distincts, et la combustion devient trop complète pour être assez éclairante.

Le bec de 30 jets est le plus employé. La quantité d'air nécessaire à la combustion diminue quand la dépense augmente. La hauteur du verre la plus favorable est $0^{m},20$.

Les becs d'Argand en métal s'échauffent beaucoup, et leur rayonnement est gênant. Aussi adopte-ton souvent la porcelaine pour le bec, et le verre, le cristal ou la porcelaine pour la garniture. Les becs à verre sont trop sensibles aux variations de pression et ont une tendance *au filage*. Le tableau suivant indique les conditions d'établissement et de rendement des becs de ce système :

Nombre de trous.	8	10	15	20	25
Lumière	360	360	391	409	382
Dépense	367	318	296	289	375
Intensité relative.	98	118	132	141	139

679. Becs de gaz perfectionnés. Par suite de la concurrence de l'éclairage électrique, les fabricants de gaz ont été stimulés à perfectionner leurs appareils. Ils sont arrivés à réaliser des progrès considérables. Les becs perfectionnés peuvent se diviser en trois classes :

1° Becs dans lesquels la température de combustion est augmentée en chauffant l'air d'alimentation par sa circulation en sens inverse des produits de combustion, dans un appareil appelé *récupérateur* de chaleur.

2° Becs dans lesquels le gaz porte à l'incandescence une matière donnant une intensité lumineuse supérieure à celle du carbone incandescent en suspension dans la flamme.

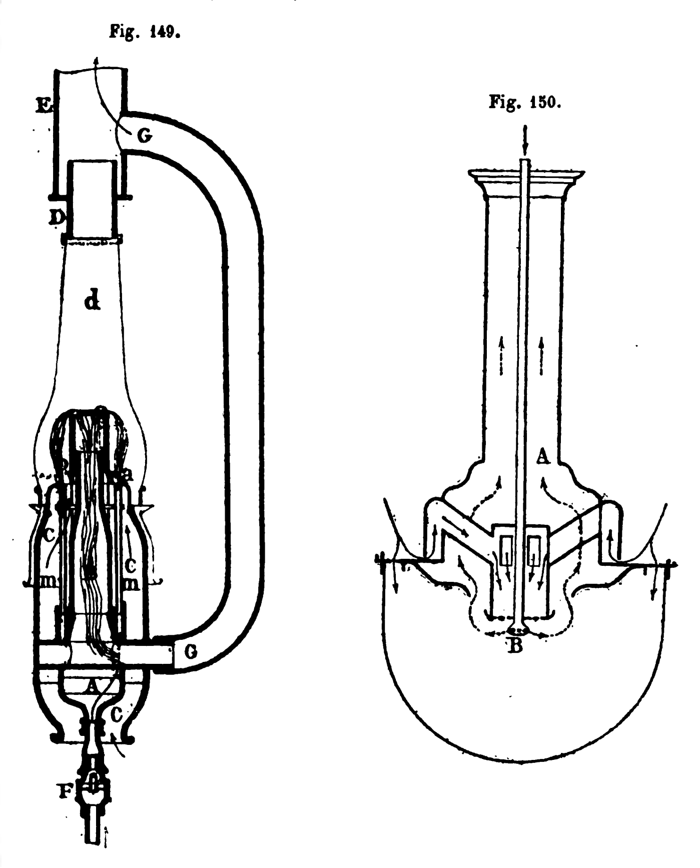
3° Becs dans lesquels le gaz a son pouvoir éclairant augmenté par l'addition d'hydrocarbures riches.

Le bec à récupération le plus ancien est celui de Chaussenot, qui date de 1836; mais le bec Frédéric Siemens ne date que de 1879. Ce système (*fig.* 149) est constitué par trois boîtes concentriques A, B, C. Le gaz arrive par une tubulure inférieure, traverse un régulateur de pression F et se répand dans la chambre A; il monte jusqu'au bec pro-

prement dit par les tubes verticaux *m*. La flamme est aspirée dans la cheminée centrale B, et les produits de la combustion redescendent, échauffant ainsi les parois de la boîte C, par laquelle arrive l'air extérieur, et s'échappent par la cheminée latérale G. Un nouveau brûleur Siemens, à flammes plates, date de 1883. Vinrent ensuite les becs Schulke (bec parisien), l'Industriel, Guibout-Giroud, Delmas-Azéma, enfin le bec Wenham (en 1885).

Fig. 149.

Fig. 150.



Ce dernier est un des plus répandus. Dans son modèle perfectionné et simplifié (*fig.* 150), le brûleur B est un bouton en *stéatite* (1) percé d'une couronne de trous circulaires, fixé à l'extrémité du tube d'arrivée du gaz A, au centre du récupérateur. Celui-ci est constitué par deux cylindres concentriques en fonte, reliés par des tubes parallélipipédiques, de section presque carrée, disposés en quinconce et inclinés sur l'axe du système. L'air, arrivant de l'extérieur, traverse les tubes pour se rendre dans le cylindre intérieur, d'où il redescend vers la

(1) La stéatite est un silicate complexe dans lequel il entre de la magnésie.

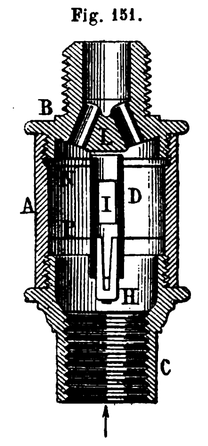
flamme. Les produits de la combustion remontent par l'espace cylindro-annulaire, entre les deux cylindres, et s'échappent par la cheminée après avoir considérablement échauffé les conduits parallélipipédiques dans lesquels passe l'air froid pour se rendre au bec. L'inclinaison de ces conduits constitue le dernier perfectionnement de la lampe Wenham. Cette disposition augmente beaucoup la surface de chauffe et les sections d'évacuation des produits de combustion. Le récupérateur est surmonté d'une cheminée et enfermé dans une enveloppe en métal ou en faïence. Autour du récupérateur, entièrement venu de fonte, se trouve une couronne faisant corps avec lui et percée d'une rangée de petits trous. Cette couronne supporte la verrine, et l'air extérieur, pénétrant par les orifices, a pour but d'empêcher une trop grande élévation de la température à l'intérieur du verre, en même temps qu'elle influe sur la forme et l'épaisseur de la flamme.

Un grand nombre de lampes dérivent du type Wenham : telles sont les lampes Ezmos, Sée, W. Sugg, Lebrun-Deselle, Danichewski, Cromatie, etc. On en trouvera la description dans une intéressante conférence faite par M. Auguste Lévy, ingénieur de la Compagnie du gaz, et publiée dans le *Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale* (mai et juin 1891). Nous nous sommes aidé de ce travail. Les lampes à récupération donnent le carcel avec 60 litres de gaz consommé pour les petites lampes, et avec 28 pour les grosses.

Régulateurs-rhéomètres. Dans les lampes à récupération, les sections d'arrivée de l'air comburant et de départ des produits de combustion sont équilibrées pour une consommation déterminée de gaz. Pour assurer l'arrivée régulière du gaz, on fait usage de régulateurs spéciaux appelés *rhéomètres*.

Les rhéomètres sont secs ou humides. Celui de Bablon est sec; il est formé (*fig.* 151) d'une boîte cylindrique A contenant un petit tube creux I, sur le milieu duquel est fixé, normalement à son axe, une petite rondelle. L'extrémité de ce tube, au-dessus de la rondelle, porte une fente d'une largeur déterminée. Enfin, un morceau de tube entre à frottement dur dans cette extrémité et porte une fente semblable à celle du tube extérieur. Selon que le tube s'enfonce plus ou moins, l'orifice d'écoulement du gaz, représenté par l'espace libre entre les deux fenêtres, est plus ou moins grand. L'extrémité du tube s'engage de plus dans l'orifice de sortie du gaz ménagé à la partie supérieure de la boîte. La pression du gaz soulève le flotteur d'autant plus qu'elle est plus grande; l'orifice d'évacuation est donc par suite plus ou moins fermé, et la pression reste constante. En effet, soit S la surface du disque, h la pression au-dessous, h' la pression au-dessus, P le poids du disque, l'équation d'équilibre est :

Fig. 151.

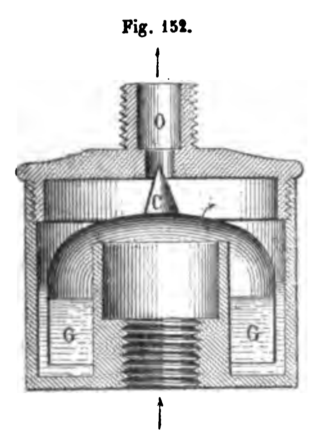


$$P = S(h-h'),$$

$h - h'$ est la pression qui détermine la consommation du gaz; elle est constante et égale à $\frac{P}{S}$.

Parmi les régulateurs humides figurent ceux de Giroud et de Parsy-Derval. Le rhéomètre Giroud, à glycérine, se compose (*fig.* 152) d'une boîte cylindrique renfermant une cloche très légère, percée d'un trou à la partie supérieure et surmontée d'un petit cône C. La cloche, dont le poids est calculé suivant la densité du gaz, repose sur un bain de glycérine GG, et le petit cône C s'engage dans l'orifice O de sortie du gaz. Le gaz arrive sous la cloche qu'il soulève plus ou moins, selon la pression, et s'échappe par la petite ouverture ménagée dans la cloche; mais à mesure que cette dernière se soulève, l'orifice d'évacuation du gaz est plus ou moins obstrué par le petit cône. La cloche joue le rôle du disque dans le régulateur Bablon (p. 837).

Fig. 152.



Becs à incandescence. Le bec Sellon se compose d'un brûleur Bunsen portant à l'incandescence une mèche en toile de platine iridié. Il est nécessaire que le mélange d'air et de gaz soit de 1 volume de gaz pour 5,7 d'air. Ce bec donne le carcel avec 75 litres (mèche neuve) ou 130 litres (mèche usée).

Le bec Clamond est un bec circulaire à trous et à double courant d'air, dont la flamme porte à l'incandescence un morceau de magnésie filetée posé sur le bec.

Le bec Auer von Welsbach se compose d'un brûleur Bunsen qui porte à l'incandescence une mèche de tulle imbibée de chlorure de zircone, mélangée à des oxydes de lanthane et autres métaux. Le mélange d'air et de gaz doit se faire dans la proportion de 2^{lit},8 d'air pour 1 de gaz. Le bec Auer a un pouvoir éclairant de 18 bougies et donne une économie de 60 p. 100 de gaz en le comparant aux meilleurs becs d'Argand (p. 834).

Becs à hydrocarbures. Le principal est le type *albo-carbon;* c'est un bec à fente ordinaire placé devant une boule métallique renfermant des crayons d'albo-carbon ou naphtaline. Le gaz traverse la boule et se charge de vapeurs de naphtaline avant d'arriver au bec, qui échauffe d'ailleurs la boule et la naphtaline qu'elle renferme. Cette matière fond à 80°. La flamme est blanche. Un mélange d'albo-carbon et de gaz d'éclairage, brûlant dans un bec de 90 litres, a le pouvoir lumineux de 3 lampes carcel.

680. Service du gaz à Paris. La Compagnie parisienne d'éclairage et de chauffage par le gaz traite annuellement environ 870 000 tonnes de matières premières. En 1890, elle a distribué à Paris 268 441 472 mètres cubes de gaz, se répartissant ainsi :

	tonnes.
Voies publiques	27010376
Établissements municipaux	18431409
Administrations, établissements publics	4355986
Particuliers	218643701

Au 31 décembre 1888, la compagnie avait à Paris 1960 kilomètres de conduites en tôle et bitume, et 240 kilomètres de conduites en fonte. Ces dernières tendent à diminuer. Les conduites en tôle et bitume ont, au contraire, augmenté beaucoup depuis 20 ans (693).

Un décret, du 25 juillet 1855, approuve le traité du 23 juillet de la même année, entre la Ville et la compagnie du gaz, pour la concession de l'éclairage et du chauffage au gaz dans Paris. Nous allons donner un extrait du cahier des charges, en indiquant les modifications qui résultent des traités postérieurs du 25 janvier 1861 et du 7 février 1870.

La Ville de Paris concède à la compagnie du gaz le droit exclusif de conserver et d'établir des tuyaux pour la conduite du gaz d'éclairage et de chauffage sous les voies publiques.

Cette concession est faite pour 50 années, qui commencent le 1er janvier 1856.

La Ville se réserve le droit de faire déplacer et même enlever, aux frais du concessionnaire et sans aucune indemnité, les tuyaux de conduite, toutes les fois que l'intérêt public l'exige.

L'administration aura le droit d'autoriser des essais d'éclairage et de chauffage par tous les systèmes qui pourront se produire, dans une limite de 1000 mètres de longueur par chaque essai, et sans que l'exercice de ce droit puisse donner lieu à aucune indemnité en faveur des concessionnaires.

Cette société ne pourra demander d'augmenter son capital en actions au delà de 84000000 de francs qu'après un avis du préfet de la Seine et du conseil municipal.

Depuis le 1er janvier 1869, la Ville a droit à la moitié des bénéfices réalisés par la compagnie. Avant tout partage, il sera prélevé : 1° les sommes nécessaires pour annuités d'amortissement des actions et obligations émises ou à émettre ; 2° la retenue fixée pour la réserve par les statuts ; 3° une somme, pour dividende et intérêts des actions, de 11200000 francs, depuis le 1er janvier 1888.

Les usines à gaz et les usines annexes de la compagnie qui se trouvent comprises dans les limites de Paris, seront considérées comme entrepôt réel, c'est-à-dire qu'elles se trouveront dans le même cas que si elles étaient situées en dehors des limites de l'octroi. Les composés de houille, coke, goudrons, brais, naphtaline, huiles lourdes ou essentielles, essence de houille, produits ammoniacaux, etc., n'auront à supporter les taxes d'octroi que pour les quantités livrées dans Paris à la consommation locale. En revanche, la compagnie payera à la caisse municipale une redevance de 0fr,02 par mètre cube de gaz consommé dans Paris.

Dispositions communes à l'éclairage public et particulier. L'éclairage se fait par le gaz extrait de la houille. Il ne pourra être employé d'autre gaz sans le consentement du préfet de police, après délibération du conseil municipal. Le gaz sera parfaitement épuré, et son pouvoir éclairant devra être tel que, sous une pression de 2 à 3 millimètres d'eau, l'éclat d'une lampe Carcel brûlant 42 grammes d'huile de colza épurée à l'heure puisse être obtenue avec une consommation de 105 litres de gaz à l'heure en moyenne. La compagnie sera tenue de fournir les appareils et les locaux nécessaires à la constatation du pouvoir éclairant, qui s'effectuera chaque jour de la manière suivante :

Les expérimentateurs prendront pour type du brûleur de gaz le bec Benghel en porcelaine, à 30 trous, brûlant sous 2 à 3 millimètres d'eau de pression, avec un verre de 0m,20 de haut, et 0m,049 de diamètre en bas et 0m,052 en haut. Ils en régleront la flamme pour avoir une lumière d'une valeur égale à celle de la lampe Carcel, brûlant 42 grammes d'huile à l'heure, sous les conditions spécifiées dans l'Instruction de Dumas et Regnault, jointe au présent traité (681).

Les deux flammes ayant été maintenues bien exactement égales en intensité pendant

le temps nécessaire pour brûler 10 grammes d'huile, les expérimentateurs mesureront le gaz consommé, qui devra s'élever en moyenne à 25 litres. Les essais se feront au moyen de l'appareil décrit et suivant le mode indiqué dans l'Instruction de Dumas et Regnault (681). Chaque appareil devra être reçu par les ingénieurs de la Ville de Paris, et il ne sera mis en service qu'après avoir été vérifié contradictoirement par les agents de la Ville et ceux de la compagnie. Les appareils d'essais seront placés dans les bureaux de section de la compagnie, dans une pièce dont les agents de la Ville auront seuls la clef; ceux de ses bureaux destinés aux essais seront choisis, d'accord avec la compagnie, vers la région moyenne du réseau alimenté par l'usine à laquelle correspondra le bureau. Il y aura autant de bureaux d'essai qu'il conviendra à l'administration municipale d'en établir, mais au moins un par chaque usine à gaz et deux sur les usines importantes. Les essais seront effectués de 8 à 11 heures du soir. Les expérimentateurs feront trois essais à une demi-heure d'intervalle, et ils en prendront la moyenne.

Si la consommation du gaz, qui doit être de 25 litres, dépassait $27^{l},50$, il en serait donné immédiatement connaissance à M. le préfet de la Seine et à la compagnie.

Si, par suite du progrès de la science, l'administration, de l'avis du conseil municipal, jugeait convenable d'imposer à la société l'emploi de procédés étrangers au système actuel de fabrication du gaz, celle-ci serait tenue de se conformer aux prescriptions de l'administration. Dans le cas où l'emploi de ces nouveaux procédés aurait pour résultat un abaissement notable dans le prix de revient du gaz, la société serait obligée de faire profiter l'éclairage public et particulier de cet abaissement de prix, dans les proportions déterminées par l'autorité administrative, toujours de l'avis du conseil municipal. Il en serait de même pour le cas où, sans attendre l'intervention administrative, la société aurait pris l'initiative de l'application de procédés nouveaux. Ces stipulations ne seront applicables que par périodes de cinq ans.

Dans les derniers mois de chaque période, tous les procédés étrangers au système actuel de fabrication qui seraient jugés de nature à constituer un progrès, seront examinés par une commission qui sera désignée par le ministre de l'intérieur, et qui indiquera les perfectionnements ou inventions qui lui paraîtront pouvoir recevoir une application industrielle et manufacturière. En cas de découverte d'un mode d'éclairage autre que l'éclairage par le gaz, l'administration se réserve le droit de concéder toute autorisation nécessaire pour l'établissement du nouveau système d'éclairage, sans être tenue à aucune indemnité envers la société actuelle.

L'administration, après avoir entendu la société, pourra prescrire soit dans la direction des conduites, soit dans la dimension et la nature des tuyaux, toutes les modifications successives que lui paraîtra exiger la bonne exécution du service.

La compagnie sera tenue de poser deux conduites sous les trottoirs, dans toutes les voies à canaliser ayant 14 mètres de largeur et au-dessus, et dans celles qui recevront une chaussée en asphalte comprimé, quelle que soit leur largeur. Afin de garantir des effets du gaz les arbres des promenades publiques, la compagnie exécutera le drainage des conduites à établir sous les voies plantées et entourera les branchements de drains en terre cuite. Le drainage des conduites consistera à garnir les deux côtés et le dessus de la conduite de pierres cassées, sur une épaisseur de $0^{m},15$ à $0^{m},30$, suivant le diamètre des conduites, et à couvrir cet empierrement d'une enveloppe s'opposant à l'infiltration des sables et des terres dans les interstices des pierres. Le prix de réfection des chaussées et trottoirs à payer à la Ville, pour les conduites et branchements de toute nature à établir ou à réparer, est fixé à 3 francs par mètre carré.

Pendant la durée de l'éclairage et pendant toute la durée du jour, dans les quartiers où l'état de la canalisation et le nombre des consommateurs le permettront, le gaz devra être tenu, dans les conduites, sous une pression de $0^{m},020$, afin qu'il arrive aux becs en quantité suffisante, même dans le cas où il aurait à traverser un compteur.

Pour assurer les services public et particulier, la société aura constamment en magasin, ou en cours de transport, un approvisionnement d'un mois en matières premières destinées à la fabrication du gaz.

Éclairage public. Cet éclairage comprend non seulement toutes les voies publiques existantes et celles qui pourraient être créées, mais encore tous les établissements et propriétés de la Ville de Paris (notamment les théâtres lui appartenant) et de l'Assistance publique qui seront désignés comme tels à la compagnie par le préfet de la

Seine, pendant le cours de la présente concession. Il comprendra en outre les établissements départementaux et les établissements militaires situés dans Paris et qui seront indiqués à la compagnie de la même manière. Il y aura trois séries de becs. La dimension de la flamme sera au minimum, savoir :

1re série, consommant	100	litres à l'heure,	0m,057	de largeur sur	0m,029	de hauteur;
2e	— 140	—	0m,067	—	0m,032	—
3e	— 200	—	0m,094	—	0m,045	—

Le prix est fixé par heure, pour les becs de la	1re série,	à. . . .	0fr,015
— —	2e —	à. . . .	0 ,021
— —	3e —	à. . . .	0 ,030

Lorsque le gaz sera livré au compteur, il sera payé à raison de 0fr,15 le mètre cube

Les modèles des brûleurs employés seront déterminés par le préfet de police.

L'éclairage public est divisé en éclairage permanent et en éclairage variable. L'éclairage permanent fonctionne du soir au matin, sans interruption. L'éclairage variable est subordonné aux besoins des localités. La nature de l'éclairage sera fixée par le préfet de police, qui aura toujours le droit de la modifier.

Éclairage particulier. La société sera tenue de fournir le gaz à toute personne qui aura contracté un abonnement de trois mois au moins, et qui se sera d'ailleurs conformée aux dispositions des règlements concernant la pose des appareils. Les polices en vertu desquelles seront souscrits les abonnements devront être conformes à un modèle approuvé par l'administration. Les abonnements pourront être faits pour tous les jours. sans exception, ou en exceptant les dimanches et fêtes. Aucun abonnement ne pourra être refusé, mais la société sera en droit d'exiger que le payement s'en fasse par mois et d'avance.

Le gaz sera fourni, soit au compteur, soit au bec et à l'heure, à la volonté des abonnés.

Un modèle de chaque système de compteur, approuvé par l'administration, sera déposé à la préfecture de police. Les compteurs seront à la charge des abonnés, qui auront la faculté de les prendre parmi les systèmes autorisés, et de les faire poser et entretenir par des ouvriers de leur choix, sauf les droits des fabricants brevetés. Ils ne pourront être mis en service qu'après avoir été vérifiés et poinçonnés par l'administration. Ils seront soumis, quant à leur exactitude et à la régularité de leur marche, à toutes les vérifications que l'administration pourra prescrire, sans préjudice de celles que les abonnés ou la société voudraient faire effectuer par les voies de droit.

Les abonnés au compteur pourront distribuer leur gaz comme bon leur semblera soit à l'intérieur, soit à l'extérieur de leur domicile, sans que, dans le cas où le nombre de becs éclairés serait augmenté, il puisse en résulter aucune action contre la société, à raison de la faiblesse de l'éclairage.

Le prix du mètre cube de gaz vendu au compteur est fixé à 0f,30 pour les 50 années de la concession.

Elle sera tenue de fournir, en location, des compteurs d'un système de son choix à tous ceux de ses abonnés qui lui en demanderont. Le prix de cette location sera déterminé par le préfet de police, et indiqué sur la police d'abonnement.

Les prix de vente du gaz livré à l'heure au moyen de becs cylindriques, à double courant d'air, dits d'*Argand* (p. 834), seront débattus de gré à gré entre la société et les abonnés.

La société devra, pour tous les consommateurs qui le demanderont, convertir immédiatement les abonnements à l'heure en abonnements au compteur.

Pendant toute la durée de la concession, le prix de tout autre bec que celui qui est déterminé dans l'article précédent, ou d'un éclairage qui aurait lieu hors des heures de service, sera débattu de gré à gré entre la société et les abonnés. Il en sera de même pour les becs cylindriques percés de 20 trous, qui seraient placés à l'extérieur.

Les abonnés ne pourront exiger d'éclairage soit au compteur, soit au bec, que pendant le temps où les conduites de la société seront en charge pour le service ordinaire; les conditions des livraisons de gaz qui devraient avoir lieu en dehors de ce temps, seront réglées de gré à gré entre la société et ses abonnés, sauf le cas prévu par l'article 13.

Chauffage. En ce qui concerne l'application du gaz au chauffage, la société se

conformera à toutes les dispositions qui lui seront prescrites par l'administration municipale, sans toutefois que celle-ci puisse lui imposer des prix autres que ceux qui sont fixés pour le gaz d'éclairage.

Annexe. A l'expiration de la concession, la Ville de Paris deviendra propriétaire de plein droit, et entrera en possession des tuyaux, robinets, siphons, regards, valves et autres accessoires qui existeront alors sous les voies publiques.

681. Vérification du pouvoir éclairant (d'après J.-B. Dumas et V. Regnault). La flamme de la lampe Carcel prise pour type et celle du bec de gaz normal sont amenées et maintenues à une égale intensité, sous le rapport du pouvoir éclairant. Quand la lampe a brûlé 10 grammes d'huile, le bec doit avoir brûlé 25 litres de gaz, s'échappant sous la pression de 2 à 3 millimètres d'eau.

1° *Description des appareils* :

	mill.
Lampe Carcel. Diamètre extérieur du bec.	23,5
Diamètre intérieur du bec (ou du courant d'air intérieur). . .	17
Diamètre du courant d'air extérieur	45,5
Hauteur totale du verre	290
Distance du coude à la base du verre.	61
Diamètre extérieur au niveau du coude.	47
Diamètre extérieur du verre pris au haut de la cheminée . .	34
Epaisseur moyenne du verre	2

Conditions de la mèche. Mèche moyenne, dite *mèche des phares.* La tresse est composé de 75 brins. Le décimètre de longueur pèse 3gr,6. Les mèches doivent être conservées dans un endroit sec, ou, si le local est humide, dans une boîte contenant de la chaux vive dans un double fond; cette chaux sera renouvelée avant sa complète extinction.

Conditions de l'huile. On emploiera de l'huile de colza épurée.

Bec à gaz. Le bec d'essai est un bec Benghel en porcelaine à 30 trous, avec panier et sans cône, comme on le voit en B, figure 153, p. 844.

	mill.
Hauteur totale du bec.	80
Distance de la naissance de la galerie au sommet du bec. . .	31
Hauteur de la partie cylindrique du bec.	46
Diamètre extérieur du cylindre en porcelaine	22,5
Diamètre du courant d'air extérieur	9
Diamètre du cercle sur lequel sont percés les trous	16,5
Diamètre moyen des trous	0,6
Hauteur du verre	200
Épaisseur du verre	3
Diamètre extérieur du verre { en haut	52
Diamètre extérieur du verre { en bas.	49
Nombre de trous percés dans le panier	109
Diamètre des trous du panier.	3

Les becs qui seront employés aux essais devront avoir été préalablement comparés aux becs types conservés sous scellés.

2° *Préparation de l'essai.* L'essai comprend l'allumage et les mesures.

Allumage de la lampe. Mettre une mèche neuve. La couper à fleur du porte-mèche. Remplir la lampe exactement d'huile, jusqu'à la naissance de la galerie. Monter la lampe. L'allumer, en maintenant d'abord la mèche à 5 ou 6 millimètres de hauteur. Placer le verre.

Pour régler la dépense, on élève la mèche à une hauteur de 10 millimètres, et le verre de telle sorte que le coude soit à une hauteur de 7 millimètres au-dessus du niveau de la mèche. Pour obtenir ces conditions, on fait affleurer la pointe inférieure du petit appareil qui est adapté au porte-mèche avec la mèche elle-même, et la pointe supérieure avec un trait en diamant marqué sur le col du verre.

La lampe doit consommer 42 grammes d'huile à l'heure, et il importe de la régler à ce chiffre. Quand la consommation descend au-dessous de 38 grammes, ou qu'elle s'élève au-dessus de 46 grammes, l'essai est annulé.

Allumage du bec: On allume le bec, en ayant soin de faire porter la partie inférieure du verre sur la base de la galerie. On le laisse brûler, ainsi que la lampe, une demi-heure avant de commencer l'opération.

On mesure la pression sur le manomètre adapté au porte-bec. Elle doit être de 2 à 3 millimètres d'eau.

Mesures. Tarer la lampe. Pour cela, la placer dans le cylindre fixé à l'un des plateaux de la balance, et établir l'équilibre au moyen de grenailles de plomb. Ajouter, sur le plateau où se trouve la lampe, un petit poids supplémentaire (A). Établir la communication du fléau de la balance avec le timbre. S'assurer, au moyen des mires, que la flamme de la lampe et celle du bec sont à la même hauteur et à une même distance de l'écran. Ramener au zéro l'aiguille mobile sur l'axe du compteur à gaz, et celle du compteur à secondes.

3° *Essai*. Se placer derrière la lunette. Pour obtenir des lumières égales dans les deux moitiés de l'écran, on fait varier la dépense de gaz au moyen du robinet à vis placé sur le compteur. Il est commode, pour apprécier plus justement les intensités relatives des deux lumières, de se servir des petites lames mobiles au moyen d'une vis, qui servent à diminuer le champ de l'instrument.

Quand le marteau frappe sur le timbre, on fait partir l'aiguille du compteur en tirant à soi le levier qui met en mouvement les deux aiguilles.

Accrocher le poids B au plateau dans lequel se trouve la lampe. Rétablir la communication du fléau avec le timbre.

Pendant tout le temps que dure l'essai, on doit observer dans la lunette si l'égalité des deux lumières se maintient; au besoin, on la rétablit en réglant l'arrivée du gaz à l'aide du robinet à vis. Au moment où le marteau frappe de nouveau sur le timbre, on presse sur le levier pour arrêter les deux aiguilles.

4° *Résultat de l'essai. Calcul*. Lire la dépense sur le cadran du compteur. Lire la pression sur le manomètre adapté au porte-bec.

Exemple de calcul. Le compteur marque . . . . $24^{l},5$
Comme le poids B pèse. 10^{gr},

la dépense de gaz pour 42 grammes d'huile sera $2,45 \times 42 = 102^{l},9$.

Cet essai sera répété trois fois, de demi-heure en demi-heure. La lampe et le bec allumés au commencement de l'opération serviront, dans les mêmes conditions, pour le reste de l'expérience. On prendra la moyenne des trois résultats.

La consommation normale de la lampe étant de 42 grammes d'huile à l'heure, pour brûler 10 grammes d'huile, il faudra 14' 17''.

Ainsi, le compteur à secondes permet de déterminer, dans chaque expérience, la consommation d'huile que la lampe fait par heure, et de reconnaître si l'on est dans les limites indiquées plus haut. Par exemple, le compteur à secondes marque 15' 30'', soit 15',5. D'après la proportion suivante, on aura :

$$10 : 15,5 = x : 60, \quad \text{d'où} \quad x = 38^{gr},7,$$

consommation d'huile de la lampe par heure.

5° *Vérification du compteur*. Elle doit être faite tous les huit jours, en présence d'un agent de la compagnie.

Préparation de l'expérience. Remplir d'eau le gazomètre. Y introduire le gaz. Pour cela, on ouvre le robinet qui donne accès au gaz, et, en même temps, celui qui laisse écouler l'eau. Recueillir dans un vase l'eau qui s'échappe et l'introduire dans le réservoir supérieur. Le gazomètre étant plein de gaz, fermer le robinet inférieur.

On doit s'assurer alors s'il n'y a pas de fuite dans l'ensemble des appareils. Pour cela, on ferme le robinet du porte-bec, on ouvre le robinet qui met en communication le gazomètre et le compteur, ainsi que le robinet à vis. On fait couler un peu d'eau du réservoir dans le gazomètre, jusqu'à ce que le manomètre marque une pression de $0^{m},05$ d'eau. Si cette pression n'a pas varié au bout de 5 minutes, il n'y a pas de fuite dans l'appareil.

Expérience. Ramener à zéro l'aiguille du compteur. Ouvrir en plein le robinet du compteur et celui du porte-bec. Faire écouler l'eau du réservoir dans le gazomètre, au moyen du robinet disposé à cet effet. On règle l'écoulement de l'eau au moyen

de ce robinet, de telle sorte que la pression indiquée par le manomètre ne dépasse pas $0^m,003$.

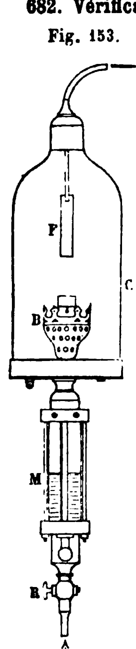
Quand le niveau de l'eau dans le gazomètre se trouve au zéro de l'échelle, faire partir l'aiguille mobile du compteur. Quand le niveau de l'eau arrive dans le gazomètre au degré 25, on arrête l'aiguille du compteur. On lit la division marquée par cette aiguille; si ces deux nombres sont d'accord, le compteur est exact.

Dans le cas où le nombre de litres représenté par la marche du compteur et celui qui serait indiqué par le gazomètre ne seraient pas d'accord, on répétera l'expérience trois fois chaque jour, pendant toute la semaine, et on prendra la moyenne.

Si la dépense du compteur, mesurée au gazomètre, présente des variations qui dépassent 1 p. 100, c'est-à-dire $0^l,25$, ou bien 2,5 divisions pour les 25 litres du compteur, celui-ci doit être mis en réparation et remplacé.

682. Vérification de la bonne épuration du gaz (méthode Dumas et Regnault).

Fig. 153.



L'appareil consiste en un bec de porcelaine B, semblable à celui qui est adopté pour la détermination du pouvoir éclairant (681). Il est monté sur un petit réservoir à gaz M, muni d'un manomètre à eau. Le bec traverse un plateau sur lequel on pose une cloche tubulée en verre C. La tubulure communique avec un tube de plomb, qui déverse le gaz au dehors ou dans une cheminée.

1° *Préparation du papier d'épreuve.* Plonger des feuilles de papier blanc, non collé, dans une dissolution d'acétate neutre de plomb dans l'eau distillée, contenant 1 de sel p. 100 d'eau. Sécher ces feuilles de papier à l'air, les couper en bandes de 1 centimètre de large sur 5 centimètres de long, et les conserver dans un flacon à l'émeri, à large goulot.

2° *Essai.* Suspendre une bande de papier F, ainsi préparée, dans la cloche C de l'appareil. Ouvrir le robinet R pour y faire arriver le gaz. Le manomètre M doit indiquer une pression de 2 à 3 millimètres d'eau pendant la durée de l'expérience. Laisser la bande de papier dans le courant de gaz pendant la durée de l'un des essais relatifs au pouvoir éclairant, c'est-à-dire pendant un quart d'heure. Retirer la bande. Ecrire sur la bande le numéro du bureau et la date. La bande de papier ne doit pas brunir par l'action du gaz. Si elle ne s'est pas colorée, l'essayeur la renferme dans un flacon à l'émeri, à large goulot, où il conserve toutes les bandes d'un même trimestre. Si la bande de papier imprégnée d'acétate de plomb brunit ou noircit par son séjour dans la cloche, on réitère l'essai. L'une des bandes, numérotée et datée, est conservée dans le flacon à l'émeri. L'autre bande, également numérotée et datée, et de plus revêtue de la signature de l'essayeur, est envoyée, sous pli cacheté, à M. le directeur des travaux publics de la Ville de Paris.

683. Vérificateur Giroud. L'appareil photométrique de Dumas et Regnault est trop délicat pour la pratique.

On a constaté que pour un gaz extrait de la houille les variations du pouvoir éclairant correspondent, toutes choses égales d'ailleurs, à des changements dans la hauteur de la flamme, et que celle-ci est d'autant plus grande que le pouvoir éclairant absolu est plus considérable.

M. Arson, ingénieur en chef de la compagnie du gaz, a formulé les lois suivantes :

1° Quand on mêle au gaz de houille des gaz non combustibles, comme l'air, l'acide carbonique, etc., on diminue le pouvoir éclairant (p. 849) et, en même temps, la hauteur de la flamme. Pour 1/100 de gaz introduit, on a environ 1/10 de réduction de hauteur.

2° Si les gaz introduits sont combustibles et éclairants, comme les hydrocarbures

(p. 838), les augmentations du pouvoir éclairant se traduisent par des augmentations dans la hauteur de la flamme.

3° Si ce sont des gaz combustibles et non éclairants, comme l'hydrogène, ils diminuent le pouvoir éclairant, sans diminuer sensiblement la hauteur de la flamme.

C'est sur ces données que M. Henri Giroud a basé son vérificateur.

On sait que le gaz, à Paris, doit donner la lumière d'un carcel avec le Bengel-type débitant 105 litres à l'heure (p. 839) ; l'expérience a montré que le carcel, pour un bec-bougie (p. 834) percé d'un trou de $0^m,001$, correspond à une dépense de 38 litres 1/10 à l'heure, avec une flamme de $0^m,105$ de hauteur. La dépense vraie se constate, dans le vérificateur Giroud, au moyen d'un petit gazomètre à compensateur parfaitement calibré, d'une section d'un demi-décimètre carré, branché sur un rhéomètre (p. 838) muni d'un bec-bougie et dans lequel on emmagasine le gaz pendant *une minute*. Si on ramène toujours la flamme de la bougie à la hauteur de $0^m,105$, de manière à maintenir une intensité constante, tout changement dans le pouvoir absolu du gaz sera accusé par une diminution ou une augmentation de dépense, c'est-à-dire de la course du gazomètre, puisqu'on obtiendra une intensité donnée avec un volume de gaz d'autant plus faible que ce gaz sera meilleur. Avec le gaz de Paris, le volume de 38 litres 1/10 correspond à une course du gazomètre de $0^m,127$ par minute. Si cette course change, le volume nouveau v sera au volume réglementaire 38 litres 1/10 comme le pouvoir éclairant x est au pouvoir réglementaire 1. On pourra donc écrire la proportion :

$$\frac{v}{38^{lit},1} = \frac{x}{1}, \quad \text{d'où } x = \frac{v}{38^{lit},1}.$$

Pour connaître la densité du gaz, on ferme le robinet de réglage de la flamme, qui se trouve alors réglé de manière à débiter 25 litres par heure, avec du gaz d'une densité de 0,40. Ce débit correspondra à une course du gazomètre de $0^m,0832$ en une minute. Le volume débité diminue si le gaz est plus dense, et *vice versa*. Ce changement de densité sera donc accusé par un déplacement variable de l'aiguille du gazomètre. Or, les volumes qui s'écoulent sous la même pression et par le même orifice sont en raison inverse des racines carrées des densités. Connaissant le volume réellement écoulé, on calculera facilement la densité correspondante. Un tableau fixé à l'appareil donne, pour chaque millimètre de course du gazomètre, la densité du gaz en essai et son pouvoir éclairant par rapport au carcel.

L'éprouvette Chevalet, adaptée au vérificateur Giroud, sert à titrer l'acide carbonique contenu dans le gaz. On emploie encore l'analyseur Jouanne.

684. Fabrication du gaz d'éclairage. Cornues. Les cornues servant à la distillation de la houille doivent être en fonte grise, ni trop grise ni trop blanche, afin qu'elles ne soient ni trop perméables au gaz ni trop cassantes. En les coulant debout, on obtient plus de régularité et d'homogénéité. On leur donne une section ovale ou demi-circulaire. Elles ont de $0^m,05$ à $0^m,06$ d'épaisseur, et on leur donne les plus grandes dimen-

sions possibles : leur longueur varie de $2^m,20$ à $2^m,90$; intérieurement, leur largeur est de $0^m,45$ à $0^m,64$ et leur hauteur de $0^m,30$ à $0^m,45$. Quelquefois on ne place qu'une cornue dans un four, d'autres fois 3, le plus souvent 5, et on a construit des fours à 7 et même 9 cornues. Les fours de la compagnie parisienne sont à 7 cornues. Si les cornues en terre réfractaire ne sont pas généralement employées, c'est qu'il faut une terre excellente et une parfaite exécution. On trouve de l'économie à les employer, à cause de leur moindre refroidissement pendant la charge, et surtout à cause de leur durée, qui dépasse quelquefois deux ans, au lieu que les cornues en fonte ne servent que neuf mois en moyenne, et même moins quand on coule des huiles grasses sur du coke ou de la houille; cependant les cornues en terre sont plus sujettes à des fêlures et à des ruptures instantanées que celles en fonte. Pour les petites usines, on donne souvent la préférence aux cornues en fonte, à cause des inconvénients graves résultant de la casse des cornues en terre. L'épaisseur des cornues en terre varie de 6 à 7 centimètres. Pendant les premiers jours, les cornues en terre, qui sont poreuses, laissent passer une certaine quantité de gaz; mais bientôt le carbone ferme les pores de la terre.

	mèt. c. de gaz.
Un four à 1 cornue produit en moyenne en 24 heures. .	120 à 170
— 3 cornues produit en moyenne en 24 heures. .	435
— 5 cornues produit en moyenne en 24 heures. :	725
— 6 cornues produit en moyenne en 24 heures. .	950
— 7 cornues produit en moyenne en 24 heures. .	1100

685. **Houilles** (521, 527). Pendant la distillation, le volume de la houille augmente quelquefois des 2/5 de son volume primitif; aussi a-t-on soin de charger un volume de houille qui n'est guère que la moitié de la capacité de la cornue (1). Le gaz commence à se produire à 100°, mais on pousse l'opération jusqu'au rouge cerise (1000°) sans dépasser le rouge blanc (1300°). La distillation d'une charge dure $4^h 15'$ pour le charbon de Mons et de Commentry; celui des mines de Buisson (Belgique) ne peut être distillé qu'en 6 heures; mais, en poussant activement la marche, on peut distiller avec du bon charbon en 3 heures seulement. Les ouvriers déchargent ou rechargent une cornue en 2 ou 3 minutes.

Dans un four à 5 cornues, on peut distiller 2500 à 2600 kilogrammes de houille en 24 heures, et le feu étant bien conduit, on brûle de 12 à 14 hectolitres de coke, c'est-à-dire de 30 à 35 p. 100 du coke produit. M. Gibon rapporte que des fours à 5 cornues, qu'il a établis à l'usine d'Arras, distillaient 7 hectolitres de houille grasse du poids de 80 kilog. par charge de 6 heures, et dépensaient pendant le même temps 2,50 hectolitres de coke (de 45 kilog. l'hectolitre).

(1) La charge des cornues, pour une durée de distillation de 4 heures, peut varier de 90 à 140 kilog. de houille.

Dépenses de coke pour la distillation d'un hectolitre (100 *litres*) *de houille de* 80 *kilog., obtenue dans une usine de Paris.*

	hect.	kilog.
Four à 1 cornue.	0,75	31,50
Four à 2 cornues, adossé	0,55	23,10
Four à 3 cornues, non adossé.	0,54	22,75
Four à 5 cornues, adossé	0,45	18,90

La distillation de 100 kilog. de houille exige de 25 à 30 kilog. de coke. Afin que les grilles ne soient pas détruites par suite de la température très élevée, on maintient une nappe d'eau dans le cendrier.

Les houilles qui conviennent le mieux pour les usines à gaz sont celles qu'on désigne en Angleterre sous les noms de *canel-coal* et de *boghead;* la composition de la première est de 74,47 de charbon, 5,42 d'hydrogène, 19,61 d'oxygène et 0,50 de cendres; elle donne 350 à 400 litres de gaz par kilog. En Angleterre, 1 hectolitre du poids de 80 kilog. produit en moyenne 24 mètres cubes de gaz; en France, les charbons de Mons, très propres à la distillation, en produisent 23 mètres cubes; le charbon de Commentry donne plus de gaz que celui de Mons, mais d'un pouvoir éclairant plus faible.

D'après M. Penot, 1 kilog. de houille, suivant qu'il était sec ou contenait 10 p. 100 d'eau, a donné respectivement 240 litres de gaz de bonne qualité et 92 de mauvaise. La houille sèche est donc préférable.

Aujourd'hui, on admet que 100 kilog. de bonne houille donnent en moyenne 30 mètres cubes de gaz, 72 kilog. de coke ($1^{h},7$), $3^{k},500$ à 6 kilog. de goudron et 6 à 9 kilog. d'eaux ammoniacales.

686. Condenseur. Le gaz, en sortant de la cornue, passe par un tube ascendant appelé *buse montante*, de $0^{m},12$ à $0^{m},15$ de diamètre, pour se rendre dans un cylindre horizontal de $0^{m},40$ de diamètre, placé en avant et au-dessus du fourneau. Ce cylindre, appelé *barillet*, contient, jusqu'à un niveau déterminé, de l'eau dans laquelle la buse montante, en se recourbant, plonge de quelques centimètres. Le barillet est garni d'un dégorgeoir qui y maintient un niveau constant, en donnant écoulement au goudron et à l'eau ammoniacale.

En sortant du barillet, le gaz passe dans un tuyau en fonte exposé à l'air ou plongé dans l'eau, et dans lequel se condense la vapeur qu'il contient. En hiver, l'air suffit pour abaisser la température du *réfrigérant;* en été, la quantité de gaz fabriqué étant beaucoup moindre, la surface réfrigérante devient plus grande par rapport au volume de gaz à refroidir, et cela peut en partie compenser l'influence d'une température atmosphérique plus élevée. Il est cependant utile de laisser couler un filet d'eau sur les colonnes réfrigérantes. Les constructeurs fixent la surface extérieure à refroidir par heure des condenseurs à raison de 1 mètre carré par mètre cube de gaz à refroidir par heure.

M. Kirkham fait passer le gaz dans l'intervalle annulaire compris entre deux tuyaux. Le condenseur est ainsi refroidi extérieurement, comme les condenseurs ordinaires, par le rayonnement, et il s'établit dans le tuyau central un courant d'air qui augmente l'action réfrigérante. La

distance des deux tuyaux étant de $0^m,0375$, une surface de 48 mètres carrés a suffi pour 100 mètres cubes de gaz à refroidir par heure.

M. d'Hurcourt, en adoptant 1 mètre pour la vitesse moyenne du gaz dans le tuyau réfrigérant, donne, pour calculer le diamètre D et la longueur L de ce tuyau, les formules :

$$D = 0,06\sqrt{T} \quad \text{et} \quad L = 900D.$$

T nombre de tonnes de houille à distiller en 24 heures.

Lorsque le gaz se divise pour passer dans plusieurs tuyaux, les formules précédentes donnent encore D et L pour chacun des tuyaux, mais en prenant pour T le nombre de tonnes qui correspond au gaz qui passe dans chaque tuyau.

Les *condenseurs à colonne se refroidissant par rayonnement* sont ceux que l'on rencontre le plus souvent. Ils sont formés d'une série de tuyaux verticaux disposés en *jeu d'orgue* et de 8 à 10 mètres de haut. Le gaz passe successivement d'une colonne dans la suivante. Pour donner écoulement aux produits de condensation, on emploie différentes dispositions. Quelquefois les tuyaux sont boulonnés sur des caisses en fonte dans lesquelles se rendent ces produits. Ces caisses sont munies de siphons qui maintiennent le liquide à un niveau constant; des diaphragmes plongeants obligent le gaz à suivre la série de tuyaux. Parfois la caisse est remplacée par un barillet-siphon. Les tubes plongent dans le liquide, et une tubulure permet au gaz de passer d'un tuyau dans le suivant. Des regards, convenablement disposés, permettent de nettoyer l'appareil.

687. Laveur. Colonne à coke. En quittant le condenseur, le gaz passe dans des laveurs, généralement en fonte, où il séjourne de 8 à 10 minutes, et où il laisse les sels ammoniacaux et l'ammoniaque qu'il contient encore. A la suite des laveurs se trouvent un ou plusieurs cylindres de fonte séparés en deux compartiments et remplis de coke; le gaz arrivant à la partie supérieure de l'un des compartiments laisse, en filtrant à travers les interstices, une nouvelle quantité de goudron et de sels ammoniacaux. L'épuration *physique* étant terminée, on passe à l'épuration *chimique*.

688. Épurateur. Le gaz passe alors dans l'épurateur, caisse, ordinairement en fonte, portant à sa partie supérieure et sur tout son contour extérieur une rigole contenant de l'eau dans laquelle plonge le bord du couvercle de la caisse, de manière à former une fermeture hydraulique. Une cloison verticale, également en fonte, qui s'élève du fond jusqu'à une petite distance du couvercle, divise la caisse en deux parties égales. A des distances verticales égales, on place dans chaque compartiment de la caisse trois claies en fer ou en osier, et quelquefois des plaques de tôle percées de trous. Ces claies sont soutenues par des tasseaux fixés aux parois de la caisse et de la cloison de division, et, garnies préalablement de mousse ou de foin, elles supportent chacune une couche de chaux éteinte pulvérulente de $0^m,06$ environ d'épaisseur, que le gaz est obligé

de traverser. On fait arriver le gaz par le fond d'un des compartiments de la caisse et il se dégage par le fond de l'autre, après avoir traversé six couches de chaux. L'acide carbonique s'unit à la chaux en formant du carbonate de chaux, l'acide sulfhydrique donne du sulfure de calcium, et une partie de l'ammoniaque est retenue mécaniquement dans les pores de la chaux.

En certains endroits on a adopté un système méthodique qui consiste en quatre caisses. Le gaz traverse toujours trois caisses pendant qu'on charge la quatrième, et l'on a soin de faire d'abord passer le gaz dans la première chargée, puis la deuxième et la troisième. Par ce moyen, on obtient facilement un gaz d'une pureté convenable pour la consommation.

La largeur des épurateurs ne dépasse pas ordinairement $1^{m},60$ à $1^{m},80$, afin que les hommes placés sur les bords puissent avec facilité atteindre le milieu des claies, y étaler la mousse ou le foin et y verser la chaux. La longueur n'a pas de limites; elle peut aller à 4 mètres.

Les claies sont en bois, ou en fer rond, ou encore en tôle de 3 à 4 millimètres d'épaisseur, percée de trous assez rapprochés de $0^{m},010$ à $0^{m},015$ de diamètre. On se sert aussi de la fonte, qui résiste mieux.

Le gaz non épuré peut contenir jusqu'à 4 p. 100 d'acide carbonique, 15 p. 100 d'ammoniaque et 1 1/2 p. 100 d'hydrogène sulfuré. La présence de l'acide carbonique augmente la longueur de la flamme; on le décèle par la propriété qu'il possède de blanchir l'eau de chaux.

La présence de l'air est préjudiciable au pouvoir éclairant. Ainsi, pour une addition d'air p. 100 de :

1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 20, 30, 40, 45,

les diminutions de pouvoir éclairant p. 100 sont respectivement :

6, 11, 18, 26, 44, 53, 67, 93, 98, 99, 100.

Il faut pour l'épuration de 100 mètres cubes de gaz, de $7^{kg},00$ à $17^{kg},50$ de chaux. Un hectolitre de chaux vive pèse 75 à 90 kilog. Cette chaux, éteinte avec de l'eau, double de volume, et couvre dans les épurateurs une surface de claies de 6^{mq}. Avec de la houille donnant un gaz contenant de 3 à 3,5 p. 100 de gaz délétères, on calcule la surface des claies à raison de 1 mètre carré par 100^{mc} de gaz à épurer en 24 heures, ces épurateurs n'étant faits qu'une fois par jour. Si la proportion de gaz délétères n'est que de 2 à 2,5 pour 100, la surface des claies descend à $0^{mq},60$ par 100^{mc} de gaz à épurer en 24 heures. Les épurateurs ont ordinairement 3 à 4 claies.

Le gaz doit, autant que possible, traverser les claies de bas en haut, et il est préférable de faire arriver le gaz par le fond plutôt que par les côtés. Quand l'épurateur n'est pas divisé en deux par une cloison verticale, après avoir traversé les claies, le gaz se dégage par une ou mieux par plusieurs issues ménagées dans les angles et les milieux de côtés de la caisse, près du sommet. L'épurateur, divisé par une cloison verticale qui se termine à $0^{m},10$ ou $0^{m},15$ du bord supérieur, est surtout employé pour les petites usines. La caisse, qui est rectangulaire, a généralement

1 mètre sur 2. Le gaz arrive par le fond d'un des compartiments et sort par le fond de l'autre. Cette disposition est commode pour les petites usines qui épurent le gaz avec deux matières. Le gaz traverse un mélange de sulfate de fer et de chaux dans le premier compartiment, et de l'hydrate de chaux dans le second. L'épuration complète se fait ainsi dans un seul épurateur.

689. Nous avons dit (687) que le gaz, en quittant le condenseur, passe dans les laveurs, où il laisse les sels ammoniacaux et l'ammoniaque qu'il renferme encore. Comme l'eau ne peut enlever la totalité de ces sels, M. Mallet a substitué à l'eau pure l'emploi du chlorure de manganèse, qui est un résidu encombrant provenant de la fabrication du chlore et des chlorures décolorants. On a soin de diviser le gaz par bulles; il suffit que la pression soit de 2 à 3 centimètres pour opérer l'absorption; des agitateurs empêchent les dépôts de se former. La dissolution s'extrait du premier laveur, dans lequel on fait passer le liquide du deuxième; celui-ci reçoit le liquide du troisième que l'on charge d'une dissolution pure : par là, l'épuration est méthodique. Ce procédé rend très propre le gaz au traitement par la chaux.

Pour l'épuration du gaz fourni par une tonne de houille, on emploie 80 kilog. de solution de chlorure de manganèse à 28°, que l'on étend à 10°, et dont on sature l'excès d'acide avec un peu d'eau ammoniacale. Les liquides d'épuration qui aboutissent dans le grand récipient sont soutirés au clair, et une pompe porte cette solution de chlorhydrate d'ammoniaque dans des chaudières évaporatoires, où elle cristallise par refroidissement. Le chlorhydrate d'ammoniaque obtenu, mis à égoutter, est séché et livré au commerce. On obtient ainsi au moins 6 kilog. de chlorhydrate d'ammoniaque par tonne de houille distillée. A défaut de chlorure de manganèse, on peut employer le sulfate de fer de basse qualité, qui ne coûte que 8 francs les 100 kilog. à Paris, et même 5 à 6 francs s'il n'est pas cristallisé.

Quand le procédé Mallet n'est pas usité, le gaz sortant des épurateurs à chaux passe dans une caisse entourée d'une autre concentrique ayant même fond. Le gaz arrive dans la première caisse et passe dans la seconde en traversant des fentes horizontales faites dans les parois de la première. Comme on maintient de l'eau à un niveau supérieur à ces fentes, le gaz, pour passer dans la caisse extérieure, est obligé de traverser cette eau, où il laisse en grande partie son ammoniaque. Des petites hottes, placées à la sortie des fentes, divisent le gaz.

M. Mallet épure le gaz en une seule opération, en plaçant sur les claies de l'épurateur un mélange humide de sulfate et d'oxyde de plomb, mélange qui se revivifie presque indéfiniment, après sa transformation sur les claies en sulfate d'ammoniaque et en sulfure de plomb. Enfin, à cause de la difficulté de se procurer du sulfate de plomb, MM. Laming et Mallet ont remplacé le mélange précédent par un mélange intime de sulfate de chaux et d'un oxyde métallique quelconque à l'état d'hydrate, spécialement ceux de fer, de manganèse, de zinc.

La *matière de Laming* se prépare en mélangeant un même poids de

sciure de bois et de chaux tamisée, que l'on éteint; on ajoute ensuite une solution de sulfate de fer, et on laisse l'air faire son action, jusqu'à ce qu'on obtienne une matière brun rouge. On compte $0^{m2},35$ de claie pour 100 mètres cubes de gaz fabriqués en 24 heures; la matière de Laming se place sur les claies par lits de $0^{m},30$ d'épaisseur.

M. Cavaillon fait passer le gaz à travers des plâtras de démolition réduits en poudre grenue et disposés sur les claies d'un épurateur. Le gaz, ainsi débarrassé du carbonate d'ammoniaque, passe dans les épurateurs méthodiques chargés de chaux hydratée, où il se débarrasse de l'acide sulfhydrique ou plutôt du sulfhydrate d'ammoniaque. La poudre de plâtras, avant son emploi, est humectée au point où elle prend de la consistance lorsqu'on la presse fortement dans la main, et l'on y mélange 1/10 de son volume de menu coke pour la rendre plus perméable au gaz. Pour l'épuration du gaz provenant d'une tonne de houille, on emploie 70 kilog. de plâtras et 30 kilog. de chaux.

690. Gazomètre. Quand le gaz est épuré, il se rend au gazomètre, dont la capacité dépend de la quantité de gaz qui doit se consommer dans un temps donné. Si pour l'éclairage d'une ville il faut 4000^{mc} de gaz en 10 heures, et que les cornues soient chargées 6 fois en 24 heures, chaque charge devra produire 667^{mc} de gaz, et le gazomètre devra contenir le produit de quatre charges, soit 2661^{mc}. h étant la hauteur du gazomètre et d son diamètre, comme pour la solidité il convient de faire $d = 2h$, on aura, dans le cas qui nous occupe :

$$h = \sqrt[3]{\frac{2661}{\pi}} = 9^{m},50, \qquad \text{et par suite :} \quad d = 19 \text{ mètres.}$$

Ordinairement on augmente de $0^{m},30$ à $0^{m},60$ la hauteur h. Les gazomètres des villes de province ont ordinairement de 15 à 20 mètres de diamètre; les plus grands de la capitale ont de 30 à 40 mètres.

Pour les petits gazomètres, l'*épaisseur de la tôle* est rarement inférieure à $0^{m},002$ pour le pourtour de la cloche, et à $0^{m},0025$ pour la calotte. Pour les gazomètres de 30 à 40 mètres de diamètre, on porte cette épaisseur à $0^{m},004$ ou $0^{m},005$ pour le pourtour, et à $0^{m},005$ ou $0^{m},006$ pour la calotte.

Pour un gazomètre de plus de 30 mètres cubes, les tôles du pourtour pèsent environ $9^{k},9$ par mètre carré, et celles de la calotte 11 kilog. par mètre carré. Pour un gazomètre de 30 à 150 mètres cubes, on adopte le même poids pour la calotte et $12^{k},1$ par mètre carré pour le pourtour. Enfin, les tôles de la calotte doivent peser de 12 kilog. à $12^{k},2$ par mètre carré pour les gazomètres de 150 à 900 mètres cubes, et les tôles de pourtour, $13^{k},2$ par mètre carré, pour les mêmes gazomètres. La *pression* dans un gazomètre doit varier entre 56 et 75 millimètres d'eau.

Le jeu existant sur le diamètre entre la cloche et la citerne d'un gazomètre est de 300 millimètres pour petits diamètres et de 600 millimètres pour grands diamètres de gazomètres.

Les dimensions à donner aux *guides* du gazomètre doivent résister

au vent. La pression du vent contre un cylindre creux est les $\frac{57}{100}$ de celle qui agirait sur une surface verticale plane égale à la projection du cylindre. Cette pression peut aller jusqu'à 200 kilog. par mètre carré dans les forts ouragans.

Une usine doit avoir au moins deux gazomètres, afin de pouvoir suffire à l'éclairage en cas d'accident ou de réparation.

691. Conduites (351). La canalisation du gaz donne lieu aux mêmes problèmes que celle de l'eau (186 *et suivants*); seulement, comme on a moins de données précises, il est difficile de poser des règles invariables. Aussi préfère-t-on forcer les diamètres; la dépense de premier établissement est plus grande, mais l'éclairage est meilleur, parce que les pertes de pression sont plus petites, et, de plus, on prévoit un accroissement de consommation.

D'après diverses expériences, entre autres celles exécutées par Girard, à l'hôpital Saint-Louis, sur une conduite en fonte de $0^m,081$ de diamètre et de 623 mètres de longueur, on a, pour le gaz en général :

$$P - p = p\,\frac{\varphi L}{D}.$$

P et p pressions à l'origine et à l'extrémité de la conduite, évaluées en mètres de hauteur de gaz;
L longueur de la conduite en mètres;
D diamètre intérieur de la conduite en mètres;
φ coefficient égal à 0,024.

La densité du gaz d'éclairage (677) étant environ 0,55 par rapport à l'air, on peut admettre qu'elle est 0,0007 par rapport à l'eau (464), la température différant peu de 0° et la pression de $0^m,76$. Les pressions étant représentées en mètres de hauteur d'eau, et faisant $p = \frac{v^2}{2g}$ dans le second membre de la formule précédente, puis $v = \frac{4Q}{\pi D^2}$, on a :

$$H - h = \frac{0,0007 \times 0,024 \times 8}{9,81 \times \pi^2} \times \frac{LQ^2}{D^5} = 0,0000014\,\frac{LQ^2}{D^5};$$

d'où :

$$Q = 845\sqrt{\frac{(H-h)\,D^5}{L}}.$$

Q volume de gaz écoulé par seconde.

M. Mayniel, ingénieur de la Compagnie générale d'éclairage, s'est arrêté à la formule :

$$Q = 860\sqrt{\frac{(H-h)\,D^5}{L}}, \quad \text{d'où} \quad H - h = 0,00000135\,\frac{LQ^2}{D^5}.$$

Tableau de la perte de charge, en mètres de hauteur d'eau, due au frottement du gaz dans la conduite, pour différents nombres de becs alimentés.

PERTE DE CHARGE par mètre courant.	NOMBRE DE BECS ALIMENTÉS POUR LES DIAMÈTRES DE CONDUITE :													
	$0^m,054$	$0^m,081$	$0^m,108$	$0^m,135$	$0^m,162$	$0^m,22$	$0^m,245$	$0^m,270$	$0^m,300$	$0^m,325$	$0^m,350$	$0^m,400$	$0^m,500$	$0^m,700$
m.														
0,0000125	60	153	315	550	860	1780	2385	3100	3835	4985	6210	8995	14990	35190
0,0000250	81	215	440	770	1215	2500	3350	4355	5390	7010	8730	12640	21070	49450
0,0000375	97	265	545	950	1500	3015	4135	5365	6645	8640	10760	15580	25970	60950
0,0000500	114	306	630	1100	1730	3550	4770	6195	7675	9980	12420	17990	29990	70380
0,0000625	127	343	705	1235	1940	3980	5350	6945	8600	11180	18925	20170	33610	78890
0,0000750	140	375	770	1345	2130	4350	5850	7595	9405	12225	15225	22050	36750	86250
0,0000875	151	405	830	1455	2280	4700	6320	8200	10155	13205	16440	23815	39690	93150
0,0001000	163	436	890	1565	2460	5060	6800	8830	10935	14215	17700	25640	42730	100280
0,0001125	172	460	940	1650	2600	5340	7175	9315	11535	15000	18680	27050	45080	105800
0,0001250	181	484	990	1740	2730	5620	7550	9800	12140	15780	19650	28460	47430	111320
0,000150	198	532	1090	1920	3000	6180	8300	10770	13340	17340	21600	31280	52140	122360
0,000175	214	580	1186	2080	3280	6730	9050	11745	14545	18910	23550	34100	56840	133400
0,000200	230	617	1262	2210	3495	7160	9625	12495	15475	20110	25050	35280	60470	141910
0,000225	243	658	1345	2350	3720	7640	10260	13325	16500	21450	26715	38690	64480	151340
0,000250	255	680	1396	2450	3840	7900	10605	13770	17055	22170	27610	39980	66640	156400
0,000300	280	754	1542	2700	4270	8750	11760	15270	18910	24580	30610	44335	73890	173420
0,000350	306	810	1660	2900	4560	9405	12725	16400	20315	26400	32890	47630	79380	186300
0,000400	325	872	1790	3140	4900	10125	13600	17655	21870	28430	35400	51270	85460	200560
0,000450	348	918	1860	3280	5180	10660	14320	18590	23020	29930	37270	53980	89960	211140
0,000500	365	974	2000	3470	5500	11310	15190	19720	24430	31750	39540	57270	95450	224020
0,000600	398	1068	2190	3840	6020	12400	16660	21625	26785	34820	43360	62800	104660	245640
0,000700	430	1154	2360	4150	6500	13400	18000	23370	28940	37620	46850	67860	113090	265420
0,000800	460	1233	2530	4400	6970	14315	19230	24970	30925	40200	48060	72500	120830	283600
0,000900	489	1308	2692	4650	7400	15185	20400	26485	32805	42640	53100	76910	128180	300860
0,001000	514	1379	2830	4950	7800	16010	21500	27925	34535	44850	55990	91140	135240	317170
Nombres proportionnels.	0,36	1	2,05	3,59	5,65	11,61	15,59	20,25	25,8	32,6	40,6	58,8	98,0	230,0

On a reconnu depuis que le coefficient 860 était trop faible pour les diamètres supérieurs à $0^m,30$, et qu'il convenait de le multiplier par :

$$1{,}02 \qquad 1{,}04 \qquad 1{,}07 \qquad 1{,}12 \qquad 1{,}15,$$

pour les diamètres respectifs :

$$0^m{,}325 \qquad 0^m{,}35 \qquad 0^m{,}40 \qquad 0^m{,}50 \qquad 0^m{,}70.$$

On calcule souvent le diamètre d (en centimètres) des conduites de gaz par la formule :

$$d = 0{,}354\sqrt{Q\sqrt{L}}.$$

Q consommation de gaz par heure, en mètres cubes;
L longueur de la conduite.

On doit prendre approximativement pour valeurs de la vitesse v du gaz dans les tuyaux :

Pour $Q > 100$ mètres cubes $v = 2$ mètres par seconde,
Pour $Q < 100$ id. $v = 0{,}3(1 + 0{,}1Q)$.

La plus petite pression intérieure de la conduite pour que les becs soient alimentés dans de bonnes conditions est de $0^m,020$ d'eau. Dans le gazomètre, la pression maximum étant de $0^m,150$, le plus grand excès de la pression à l'usine sur celle d'un point quelconque de la conduite est donc de $0^m,130$, et il est convenable de limiter cet excès à $0^m,100$ ou $0^m,120$.

Il est impossible que la pression se conserve uniforme sur toute la longueur de la conduite : 1° à cause du frottement du gaz dans la conduite; 2° à cause de la variation du débit sur toute la longueur de la conduite, due à la répartition et à l'allumage des becs, ainsi qu'aux fuites; 3° enfin, à cause de la différence de niveau des différents points de la conduite, d'où naît une variation de pression due à ce que la densité du gaz est moindre que celle de l'air.

La pression de 1 mètre de hauteur d'air étant équivalente à celle de $0^m,0013$ d'eau (464), la densité du gaz d'éclairage étant à peu près 0,55 (677), une hauteur de 1 mètre de gaz correspond à une pression d'eau de $0^m,0013 \times 0,55 = 0^m,000715$. Il en résulte que si la conduite va en descendant à partir de l'usine, la pression dans le gazomètre est, en outre de celle nécessaire à l'écoulement, de $0^m,0013 - 0^m,000715 = 0^m,000585$ par mètre d'abaissement de la conduite; cette dernière quantité se retranche quand la conduite est ascendante. C'est cette considération qui doit faire placer, autant que possible, l'usine au point bas de la distribution; on diminue ainsi la pression et par conséquent les fuites. A l'ancienne usine de la barrière d'Italie, la pression dépassait $0^m,09$ d'eau dans les gazomètres; aussi les fuites étaient-elles considérables. Le service de la plupart des anciennes usines de Paris ne peut être assuré au moment où la totalité des becs sont allumés, que par une pression de $0^m,08$ à $0^m,10$ d'eau dans les gazomètres, pression qui se réduit à $0^m,06$ ou $0^m,08$ à l'origine des conduites principales.

Quand une conduite n'alimente aucun branchement sur son parcours, on lui donne un diamètre uniforme calculé d'après les considérations précédentes; mais si elle alimente des branchements importants, il y a économie à diminuer le diamètre où le débit est moindre.

La consommation d'un bec ordinaire variant de 120 à 200 litres par heure, il en résulte qu'une dépense de 1 litre par seconde ou 3600 litres par heure est suffisante pour alimenter en moyenne 25 becs. Ainsi la dépense en litres par seconde multipliée par 25 donne le nombre de becs, et le nombre de becs multiplié par 0,04 donne la dépense en litres par seconde. Pour alimenter 2600 becs consommant $0^{mc},10283$ de gaz par heure, la pression étant de $0^{m},044$ d'eau, le diamètre du tuyau doit être de $0^{m},162$. Dans une expérience, un tuyau de $0^{m},108$ de diamètre a suffi, sous la pression de $0^{m},027$ d'eau, pour l'écoulement de 288 mètres cubes de gaz à l'heure.

Une distribution de 4000 à 5000 becs peut se faire par une conduite principale continue jusqu'à l'extrémité de $0^{m},22$ à $0^{m},27$ de diamètre, suivant la longueur du parcours. De cette conduite principale partent des conduites transversales de $0^{m},15$ environ, et pour les petites rues les tuyaux ont $0^{m},054$; c'est le diamètre qu'il convient d'employer pour amener le gaz à 30 becs d'un même établissement; pour 6 à 8 becs, un tuyau de $0^{m},15$ à $0^{m},20$ suffit. Pour un même diamètre le nombre des becs alimentés est très variable, puisqu'il dépend de la longueur de la conduite, de sa pente et des diverses autres causes qui tendent à modifier la charge. Pour les petits branchements en plomb, avec les diamètres :

$0^{m},027$ $0^{m},035$ $0^{m},040$ $0^{m},050$ $0^{m},055$,

les nombres de becs alimentés à 120 litres de consommation à l'heure sont environ :

10 20 25 40 50.

Comme on ne connaît pas le nombre de becs qu'un branchement devra alimenter par la suite, la Compagnie du gaz prévoit toujours une augmentation, et elle a abandonné les diamètres inférieurs à $0^{m},027$, de même que les diamètres inférieurs à $0^{m},08$ pour les conduites. Il convient de placer les tuyaux de conduite à 1 mètre et même à $1^{m},20$ de profondeur en terre, afin qu'ils ne soient atteints ni par la gelée qui les brise, ni par les vibrations des voitures.

692. Écoulement des gaz en longues conduites. (Expériences de M. Arson, ingénieur en chef de la Compagnie du gaz, et de MM. Monard et Honoré.) Les premières expériences furent exécutées en 1862 et 1863 à l'usine de Saint-Mandé, sur des tuyaux en fonte de $0^{m},325$ et $0^{m},500$ de diamètre, disposés horizontalement à la surface du sol, en deux parties parallèles de chacune 50 mètres de longueur. Un gazomètre de 15000^{m^3} fournissait le gaz nécessaire, en même temps qu'il servait à jauger les quantités de gaz écoulées. Une locomobile, actionnant une pompe rotative Beal, remplissait le gazomètre quand on avait épuisé son contenu. Ces expériences, relatives aux conduites de gros diamètres,

furent faites avec de l'air, dont la densité fut déterminée avec soin, par l'observation des températures et des pressions au moyen d'instruments précis, placés aux deux extrémités des 100 mètres de conduite soumis à l'expérience.

En 1863 et 1864, à l'usine de la Villette, on fit des expériences sur des conduites en fonte de 113 mètres de longueur pour les diamètres de 0m,050 et 0m,081, et de 268 mètres pour les diamètres de 0m,103, 0m,152 et 0m,254. On fit usage successivement du gaz d'éclairage et d'air pour les diamètres de 0m,050 et 0m,081, et d'air seulement pour les autres. L'alimentation fut demandée à un gazomètre de 10000 mètres cubes de capacité; le volume écoulé était indiqué par un compteur de fabrication par lequel passait le gaz en sortant de la conduite expérimentée. Pour rendre les appréciations plus exactes et mettre les volumes en rapport avec la sensibilité du compteur et de ses cadrans indicateurs, on employa plusieurs compteurs de dimensions différentes et de puissances proportionnées à l'importance de l'écoulement expérimenté. Un baromètre de précision, des thermomètres sensibles et la montre à secondes furent employés.

Les conduites, jointoyées au plomb, étaient soigneusement observées pendant les expériences; leur étanchéité était constatée à l'aide de l'eau de savon promenée sur les joints pendant qu'elles étaient en fonction.

Les pressions furent observées au moyen des appareils de M. Brunt. Ils consistent en une cloche à flotteur sortant de l'eau de sa cuve d'une hauteur de 0m,03 pour 0m,01 d'eau d'excès de pression du dedans au dehors. Les indications de cette cloche, déjà triples des mouvements de l'eau, sont multipliées par un jeu d'engrenage donnant avec certitude les dixièmes de millimètre de hauteur d'eau, et même les centièmes de millimètre en prenant quelques précautions. Un de ces manomètres fut placé à chaque extrémité de la conduite mise en expérience. Lorsqu'un fluide se meut dans un tuyau, si l'on introduit dans ce tuyau, normalement à son axe et à la hauteur de cet axe, un tube manométrique droit, les pressions indiquées varient depuis la paroi jusqu'à l'axe du tuyau; mais si l'on garnit l'extrémité du tube d'un disque mince de 0m,05 de diamètre, les pressions indiquées deviennent égales; c'est ce qu'on a constaté avec précision en faisant communiquer les tubes manométriques avec l'appareil de M. Brunt, et en opérant sur un tuyau de 0m,50 de diamètre dans lequel les vitesses de l'air au centre et à la circonférence étaient approximativement de 15 mètres à 9 mètres. Lorsque les filets fluides rencontrent le tube barométrique, ils se dévient en décrivant des courbes obliques par rapport à l'extrémité du tube, et il en résulte que la pression latérale est modifiée; mais quand le tube est garni d'un disque mince, les filets qui passent devant la face de ce disque, c'est-à-dire devant l'ouverture du tube barométrique, conservent leur direction parallèle à l'axe du tuyau, et il en résulte que la pression latérale n'est pas modifiée.

L'expérience confirme le principe que des filets fluides qui s'écoulent avec des mouvements rectilignes parallèles et uniformes sont tous à la

même pression dans une même section perpendiculaire à l'axe de la conduite, quelles que soient d'ailleurs les vitesses qu'ils possèdent à leur passage dans cette section. Ainsi un manomètre dont l'extrémité du tube coïncide avec la paroi intérieure du tuyau, de manière à ne dévier aucun filet fluide, indique bien la pression en tous les points de la section du tuyau. Cela suppose qu'on néglige le poids du fluide contenu dans le tuyau; ce qu'on peut faire en général pour les gaz. Dans tous les cas, la pression au niveau de l'axe est la pression moyenne.

Une fois le régime établi, les expériences ont presque toujours duré 15 minutes (tableau p. 863), et des observations furent faites toutes les 5 minutes. On a (483) :

$$V_0 = V \frac{P + p}{P + p_0} \times \frac{1 + \alpha \frac{T_1 + T_0}{2}}{1 + \alpha T}. \qquad (1)$$

V_0 volume à l'origine de la conduite;
V *id.* indiqué par le compteur;
P pression atmosphérique;
p *id.* dans le compteur;
p_0 *id.* à l'origine de la conduite;
T_0 et T_1 température à l'origine et à la fin de la conduite;
T température dans le compteur; on avait sensiblement $T = T_1$;
$\alpha = 0{,}00367$ coefficient de dilatation du gaz (482).

v_0 étant la vitesse moyenne à l'origine de la conduite, et S la section, on a :

$$v_0 = \frac{V_0}{S}. \qquad (2)$$

La hauteur de mercure indiquée par le baromètre, ramenée à 0°, est donnée par la formule :

$$H' = H \frac{1}{1 + \alpha' t}. \qquad (3)$$

H' hauteur barométrique ramenée à 0°;
H hauteur indiquée par le baromètre ;
$\alpha' = 0{,}0001815$ coefficient de dilatation du mercure (481);
t température du baromètre.

La pression atmosphérique P exprimée en eau est, 13,596 étant la densité du mercure (464) :

$$P = H' \times 13{,}596. \qquad (4)$$

Les coefficients de correction des tableaux d'expériences (page 863) sont donc donnés par la formule :

$$C = 13{,}596 \frac{1}{1 + \alpha' t}. \qquad (5)$$

Le poids Q d'un mètre cube du fluide qui s'écoule est donné par la formule :

$$Q = 1{,}293 \frac{p_0 + p_1}{2 \times 10{,}333} \times \frac{1}{1 + \alpha \frac{T_0 + T_1}{2}} \times \delta. \qquad (6)$$

1,293 poids du mètre cube d'air à 0° et sous la pression atmosphérique de $0^m,76$ de mercure ou $10^m,333$ d'eau (464);

$\frac{p_0+p_1}{2}$ pression moyenne dans la conduite, en hauteur d'eau;

δ densité du fluide qui s'écoule, celle de l'air étant 1.

La dernière colonne des tableaux relatifs aux expériences (page 863) donne la perte de charge, le fluide qui s'écoule étant supposé ramené à 0°; car, toutes choses égales d'ailleurs, la perte de charge est proportionnelle à la densité du fluide. Cette nouvelle perte de charge a servi à comparer, au moyen d'un tracé graphique, les résultats obtenus par l'observation directe avec ceux donnés par la formule finale, qui suppose le gaz à 0° et sous la pression $0^m,76$.

Choix des formules. Les résultats obtenus à Saint-Mandé avec des conduites de gros diamètres sont représentés assez exactement par la formule de d'Aubuisson (351) :

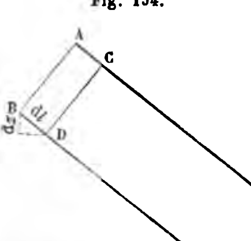
$$V = k\sqrt{\frac{HD^5}{L\delta}}. \qquad \text{(A)}$$

V volume écoulé par seconde en mètres cubes;
H hauteur d'eau représentant la perte de charge en mètres;
D diamètre de la conduite en mètres;
L longueur de la conduite en mètres;
δ densité du gaz qui s'écoule, celle de l'air étant 1;
k coefficient à déterminer par expérience.

Les expériences de la Villette, sur des conduites de petits diamètres, démontrèrent qu'il n'était pas possible d'en relier les résultats par la formule précédente, établie en tenant compte de l'expression du frottement en fonction seulement du carré de la vitesse moyenne (bv^2); mais que la formule plus complète de Prony, qui contient l'expression du frottement en fonction du premier et du second degré de la vitesse moyenne ($av + bv^2$), représente dans tous les cas les données de l'observation (184). Les valeurs de a et de b restèrent encore variables avec les diamètres, et durent être déterminées pour chacun d'eux; mais elles furent trouvées constantes pour un même diamètre avec toutes les vitesses, qui furent portées jusqu'à 12 mètres par seconde.

Suivons Bélanger dans sa théorie du mouvement permanent des gaz dans les tuyaux cylindriques. Supposons, pour simplifier la question, que le mouvement a lieu par tranches parallèles. Considérons une portion de fluide comprise entre deux sections AB, CD dont l'intervalle infiniment petit dl est parcouru dans le temps dt. Appelons :

Fig. 154.



$S = \frac{\pi D^2}{4}$ la section du tuyau dont le diamètre est D;

dz la différence de niveau des sections AB, CD;

SP et S(P + dP) les pressions totales sur les faces AB, CD;

Q le poids du mètre cube de gaz sous la pression P;

m la masse du gaz compris entre AB et CD ;
$Q\pi Ddl(av + bv^2)$ la résistance opposée par les parois du tuyau au mouvement longitudinal du gaz. On la suppose proportionnelle à la surface de contact πDdl, et l'expérience prouve qu'elle est proportionnelle à la densité du gaz.

Appliquant le principe de l'égalité entre l'accroissement de quantité de mouvement et la somme des impulsions des forces, on a (*Int.* 1494) :

$$mdv = mg \frac{d\pi}{dl} dt + SPdt - S(P + dP)dt - Q\pi Ddl(av - bv^2)dt.$$

Supprimant le terme en dz, puisque la conduite est horizontale, et divisant par dt et simplifiant, cette formule devient :

$$\frac{mdv}{dt} = -SdP - Q\pi D(av + bv^2)dl,$$

ou, en remplaçant m par $\frac{QSvdt}{g}$ ou $\frac{QSdl}{g}$, Q par $\frac{P}{K}$ et $\frac{\pi D}{S}$ par $\frac{4}{D}$,

$$\frac{vdv}{g} = -\frac{KdP}{P} - \frac{4}{D}(av + bv^2)dl.$$

Les variables v et P ont entre elles une relation simple. Le poids QSv ou $\frac{PSv}{K}$ de gaz dépensé par seconde est constant, et puisque K et S sont invariables dans l'étendue de la conduite, il s'ensuit que Pv est constant, et qu'on peut poser :

$$Pv = K', \quad \text{d'où} \quad v = \frac{K'}{P} \quad \text{et} \quad dv = -\frac{K'dP}{P^2}.$$

Substituant ces valeurs de v et dv dans l'équation précédente, elle donne, après avoir multiplié par $-P^2$:

$$\frac{K'^2dP}{gP} = KPdP + \frac{4}{D}bK'^2dl + \frac{4}{D}aK'Pdl.$$

Le seul terme Pdl n'est pas immédiatement intégrable, parce que la valeur de la pression P varie dans la longueur de la conduite. Mais comme cette pression varie d'une quantité peu considérable par rapport à ses valeurs extrêmes, on fera une erreur très peu sensible en substituant à P la moyenne arithmétique $\frac{p_0 + p_1}{2}$ entre les valeurs p_0 et p_1 prises aux deux extrémités de la conduite. En intégrant dans cette hypothèse l'équation précédente, on obtient, en désignant par L la longueur de la conduite :

$$2{,}3026\,\frac{K'^2}{g}(\log p_1 - \log p_0) = \frac{K}{2}(p_1^2 - p_0^2) + \frac{4}{D}bK'^2L + \frac{4}{D}aK'L\frac{p_0 + p_1}{2}.$$

D'où, en remplaçant K' par sa valeur p_1v_1, dans laquelle la pression p_1 et la vitesse v_1 sont prises à l'extrémité d'aval ou de sortie, on conclut :

$$\frac{v_1^2}{2g}\left(\frac{8bgL}{D} + 4{,}6052\log\frac{p_0}{r}\right) = \frac{K}{2}\left[\left(\frac{p_0}{p_1}\right)^2 - 1\right] - \frac{4L}{D}av_1\frac{p_0 + p_1}{2p_1}, \quad (7)$$

formule dans laquelle :

$$K = \frac{10\,333}{1{,}293} \times \frac{1 + \alpha T}{\delta} = \frac{7992}{\delta}(1 + \alpha T).$$

En résolvant par rapport à v_0, ce qui se fait en remplaçant K' par $p_0 v_0$, on obtient l'expression, plus en rapport avec les valeurs observées des volumes dans le gazomètre :

$$\frac{v_0^2}{2g}\left(\frac{8\,bgL}{D} + 4{,}6052 \log \frac{p_0}{p_1}\right) = \frac{K}{2}\left[1 - \left(\frac{p_1}{p_0}\right)^2\right] - \frac{4\,L}{D}\,av_0\,\frac{p_0 + p_1}{2p_0}. \quad (8)$$

Représentant :

$$\frac{v_0^2}{2g} \times \frac{8bgL}{D} \text{ par } Ab, \quad \frac{4L}{D}\,av_0\,\frac{p_0 + p_1}{2p_0} \text{ par } Ba,$$

$$\frac{v_0^2}{2g}\,4{,}6052 \log \frac{p^0}{p_1} \text{ par } C, \quad \frac{K}{2}\left[1 - \left(\frac{p_1}{p_0}\right)^2\right] \text{ par } D,$$

la formule (8) devient :

$$Ab + Ba = D - C = E. \quad (9)$$

Pour une autre expérience sur le même diamètre on a :

$$A'b + B'a = E'. \quad (10)$$

La formule (9) donne :

$$a = \frac{E - Ab}{B}. \quad (11)$$

De la formule (10) on tire, après y avoir remplacé a par cette valeur :

$$b = \frac{E'B - B'E}{AB' - BA'}.$$

Tout étant connu dans cette expression, elle permet de calculer la valeur de b, laquelle étant substituée dans la formule (11), on en conclut la valeur de a. C'est ainsi qu'ont été calculées les valeurs du tableau suivant, dont la dernière ligne est relative à des expériences faites sur une conduite en fer-blanc :

DIAMÈTRE de la conduite.	NOMBRE des expériences.	VALEURS DE *a*	VALEURS DE *b*	NATURE de la conduite.
0m,500	27	0,000020	0,000246	Fonte.
0 ,325	31	0,000151	0,000326	*Id.*
0 ,254	4	0,000237	0,000359	*Id.*
0 ,103	7	0,000560	0,000480	*Id.*
0 ,081	10	0,000589	0,000489	*Id.*
0 ,050	5	0,000702	0,000593	*Id.*
0 ,050	4	0,000738	0,000345	Fer-blanc.

Deux courbes tracées avec les valeurs des différents diamètres pour abscisses, et pour l'une des valeurs de a et pour l'autre celle de b pour ordonnées, ont des inflexions très régulières. Quoiqu'elles ne se prêtent pas à une interprétation analytique simple, ces courbes ont permis, au moyen d'une interpolation graphique, de déterminer approximativement les valeurs de a et de b pour les diamètres non expérimentés et généralement en usage dans les canalisations de gaz. En les traçant même au delà du diamètre 0m,500, le plus grand expérimenté, on a pu obtenir géométriquement les valeurs de a et de b pour les diamètres 0m,600 et 0m,700.

La courbe des valeurs de a vient rencontrer l'axe des abscisses vers le diamètre 0m,600; ce qui indique que a, qui devient faible à partir du diamètre 0m,400, est nul vers le diamètre 0m,600. C'est ce qui explique pourquoi les expériences faites à Saint-Mandé, sur de gros diamètres, ont donné des résultats représentés assez exactement par la formule (A) déduite de la théorie de Bélanger en négligeant le terme av.

Les coefficients qui ont servi à tracer ces courbes dépendent de la nature de surface et du système de joints qui se présentent le plus généralement dans les distributions de gaz; mais l'expérience faite sur une conduite en fer-blanc bien calibrée prouve qu'on trouverait des coefficients différents pour une conduite d'une autre nature en tuyaux Chameroy, par exemple. Les valeurs de a et de b obtenues pour une conduite de fer-blanc de 0m,050 de diamètre introduites dans la formule générale (8), donnent une perte de charge qui n'est que les 2/3 environ de celle que donne la conduite en fonte de même diamètre.

La détente du gaz, introduite dans la formule (8) pour obtenir les valeurs des coefficients a et b avec la plus grande exactitude, a été négligée dans la confection des tables; mais il y a lieu de remarquer qu'on ne peut négliger la détente que dans le cas où la différence entre les pressions p_0 et p_1 est très petite par rapport à ces pressions.

L'équation (8) se réduit à :

$$\frac{4L}{D} bv^2 = \frac{K}{2}\left[1 - \left(\frac{p_1}{p_0}\right)^2\right] - \frac{4L}{D} av \frac{p_0 + p_1}{2p_0},$$

ou, en posant $p_1 = p_0 - p$, la perte de charge étant p :

$$\frac{4L}{D} bv^2 = \frac{K}{2}\left(\frac{2p}{p_0} - \frac{p^2}{p_0^2}\right) - \frac{4L}{D} av \left(1 - \frac{p}{2p_0}\right).$$

Les termes $\frac{p^2}{p_0^2}$ et $\frac{p}{2p_0}$ étant très petits par rapport aux termes positifs dont ils doivent être retranchés, on peut les négliger sans erreur appréciable, et la formule précédente donne :

$$\frac{4L}{D}(av + bv^2) = \frac{K}{p_0} p,$$

d'où, $\frac{p_0}{K} = Q$ étant le poids du gaz qui s'écoule par seconde :

$$p = \frac{4L}{D} Q(av + bv^2). \qquad (12)$$

C'est au moyen de cette formule qu'ont été calculées les pertes de charge p des tables (page 864).

Pour de l'air s'écoulant avec une vitesse $v = 5^m,00$, dans une conduite dont le diamètre $P = 0^m,500$, on trouve, pour la perte de charge $p = 0^m,0274$, une longueur $L = 1000^m$ par la formule simplifiée (12), et $L = 993^m$ par la formule rigoureuse (8). Ce qui prouve que la simplification de la formule est justifiée pour la plupart des applications.

Dans la confection des tables, on s'est donné le volume V à écouler par seconde, et l'on a déduit la vitesse v de la relation :

$$V = \frac{\pi D^2}{4} v, \quad \text{d'où} \quad v = \frac{4V}{\pi D^2}.$$

Ayant v, la formule (12) a permis de calculer la perte de charge p. Cette perte de charge a été calculée pour l'air et pour le gaz, en adoptant 0,410 pour densité du gaz ; c'est la densité moyenne fournie par 12 expériences faites à l'usine de la Villette, à des heures différentes et aussi variées que possible, sur du gaz livré à la consommation.

En outre des tables, on a tracé pour chaque diamètre une courbe ayant pour abscisses les vitesses données, et pour ordonnées les pertes de charge pour une longueur $L = 1000$ mètres de conduite. Ayant tracé toutes ces courbes sur les mêmes axes, elles forment un faisceau qui contient 4 éléments : le diamètre D écrit sur la courbe correspondante, la vitesse v donnée sur l'axe des abscisses, la perte de charge p indiquée sur l'axe des ordonnées, et enfin la longueur $L = 1000^m$ de la conduite. Ce faisceau de courbes permet donc de résoudre tous les problèmes relatifs à la conduite de l'air à l'aide de tuyaux en fonte. Pour le gaz, il suffit de multiplier par 0,41 les charges ou ordonnées relatives à l'air.

De ce qui précède il résulte : 1° proportionnalité de résistance à la longueur de la conduite, à la densité du fluide qui s'écoule et à une fonction $av + bv^2$ de la vitesse moyenne ; 2° l'influence de la nature de la surface sur les coefficients a et b, et influence du diamètre sur les mêmes coefficients. Nous faisons précéder les tables calculées à l'aide de la formule (12) du tableau relatif aux expériences faites : 1° le 5 novembre 1863, avec de l'air, sur un tuyau en fonte de $0^m,254$ de diamètre et 268^m de longueur ; 2° le 14 mars 1864, avec du gaz d'éclairage d'une intensité égale à 0,407, celle de l'air à 0° et sous la pression $0^m,76$ étant 1, sur un tuyau en fonte de 0,081 de diamètre et 113^m de longueur.

Numéros des expériences.	Heures des observatio	Durées des expérienc	Relevés du compteu	V Totaux	V par 1″.	écoulés V_0, par 1″.	moyennes v_0 par 1″.	dans la conduite à l'origine T_0	dans la conduite à la fin T_1	dans la conduite moyennes $\frac{T_0+T_1}{2}$	des manomètres, en eau à l'origine.	des manomètres, en eau à la fin.	de charge en eau.	Temp. t du baromètre.	Coefficients de correction C	Hauteurs lues, en mercure.	Hauteurs transformées en eau.	Q de 1 m. c. du fluide.	de charge le fluide ramené à 0° et à 0m,76
			m. cub.	m. c.	m. cub.	m. cub.	mètres.	degr.	degr.	degrés.	mèt.	mèt.	mèt.	degr.		mèt.	mèt.	kilog.	mèt.
1° D = 0m,254.																			
8	3h30′		871					14	12,5		0,1350	0,0737		12,5		0,7695			
	3 35		971					13,7	»		0,1350	0,0738		12,4		»			
	3 40		1076					»	»		0,1354	0,0738		»		»			
	3 45	15′	1171	300	0,33333	0,3321	6,554	»	»	13,1	0,1350	0,0730	0,0616	»	13,56545	»	10,4386	1,258	0,0632
9	3 50		1248					13,7	12,5		0,1090	0,0600		12,3		0,7695			
	3 55		1335					13,5	»		0,1104	0,0604		12		»			
	4 0		1421					»	»		0,1102	0,0609		»		»			
	4 5	15′	1507	259	0,28777	0,2850	5,626	»	»	13	0,1106	0,0609	0,0495	»	13,56643	»	10,4392	1,256	0,0509
10	4 10		1547					13,2	12,5		0,0583	0,0325		12		0,7693			
	4 15		1598					13	»		0,0584	0,0326		»		»			
	4 20		1647					»	»		0,0584	0,0329		»		»			
	4 25	15′	1692	145	0,16111	0,1605	3,168	»	»	12,7	0,0584	0,0328	0,0257	»	13,56643	»	10,4396	1,253	0,0265
11	4 30		1723					13	12,5		0,0260	0,0167		12		0,7693			
	4 35		1751					»	»		0,0260	0,0168		»		»			
	4 40		1775					»	»		0,0255	0,0167		»		»			
	4 45	15′	1811	88	0,09777	0,0977	1,929	»	»	12,7	0,0255	0,0165	0,0090	»	13,56643	»	10,4366	1,256	0,0093
12	4 50		1844					13	11,5		0,0919	0,0495		11,5		0,7693			
	4 55		1900					»	»		0,0920	0,0518		»		»			
	5		1953					»	»		0,0921	0,0505		»		»			
	5 5	15′	2008	164	0,18222	0,1816	3,585	»	»	12,2	0,0921	0,0505	0,0415	»	13,56765	»	10,4356	1,258	0,0426
2° D = 0m,081.																			
18	2 5		2,400					11	12,5		0,0890	0,0663		13		0,7654			
	2 10		8,700					10,7	»		0,0890	0,0665		»		»			
	2 15		14,800					10,5	»		0,0891	0,0664		»		»			
	2 20	15′	20,800	18,400	0,020444	0,020331	3,945	10,5	»	11,6	0,0890	0,0664	0,0226	»	13,56398	»	10,3819	0,509	0,0233
19	2 25		3,600					11,5	13,2		0,0451	0,0428		13		0,7654			
	2 30		4,320					11,5	»		0,0452	0,0424		»		»			
	2 35		5,240					11,7	»		0,0455	0,0424		»		»			
	2 40	15′	5,820	2,220	0,002466	0,002459	0,477	11,7	»	12,4	0,0454	0,0426	0,0028	»	13,56398	»	10,3819	0,506	0,0029
20	2 45		0,430					11	13		0,0615	0,0512		13,5		0,7653			
	2 50		4,800					11	»		0,0615	0,0508		»		»			
	2 55		7,700					11	»		0,0615	0,0508		»		»			
	3	15′	11,300	10,870	0,012077	0,012027	2,334	11,7	»	12,1	0,0609	0,0508	0,0104	»	13,56278	»	10,3796	0,507	0,0105
21	3 5		1,600					11,3	13		0,0510	0,0456		13,5		0,7653			
	3 10		3,760					»	»		0,0508	0,0458		»		»			
	3 15		5,880					»	»		0,0504	0,0450		»		»			
	3 20	15′	8,000	6,400	0,007111	0,007083	1,374	»	»	12,1	0,0508	0,0454	0,0053	»	13,56278	»	10,3796	0,507	0,0056
22	3 25		1,320					12	13,2		0,0461	0,0430		13		0,7650			
	3 30		2,260					12	»		0,0463	0,0431		»		»			
	3 35		3,200					12	»		0,0456	0,0429		»		»			
	3 40	15′	4,160	2,840	0,003155	0,003146	0,610	11,7	»	12,5	0,0457	0,0430	0,0029	»	13,56398	»	10,3764	0,504	0,0030

Tableau des pertes de charge p *dues au mouvement des gaz dans les conduites en font[e] pour 1000 mètres de longueur, à la température de 0° et sous la pression 0m,76 de mer-cure ou 10m,333 d'eau. Pour du gaz à une température de 12°, il faudrait multiplier les pertes de charge du tableau par 0,96.*

D = 0m,050, S = 0mq,001963, a = 0,000702, b = 0,000589.

Volumes écoulés par 1″.	Volumes écoulés par heure.	Volumes en pieds cubes anglais par 1″.	Vitesses moyennes par 1″.	Pertes de charge pour 1000 mèt. en hauteur d'eau. Air.	Pertes de charge pour 1000 mèt. en hauteur d'eau. Gaz.
m. cub.	m. cub.	p. cub.	mèt.	mèt.	mèt.
0,0005	1,800	0,0176	0,254	0,0223	0,0091
0,0010	3,600	0,0353	0,509	0,0528	0,0216
0,0015	5,400	0,0529	0,764	0,0912	0,0374
0,0020	7,200	0,0706	1,018	0,1374	0,0563
0,0025	9,000	0,0883	1,273	0,1917	0,0786
0,0030	10,800	0,1059	1,528	0,2541	0,1041
0,0035	12,600	0,1236	1,782	0,3240	0,1328
0,0040	14,400	0,1412	2,037	0,4023	0,1649
0,0045	16,200	0,1589	2,291	0,4882	0,2001
0,0050	18,000	0,1766	2,546	0,5823	0,2387
0,0055	19,800	0,1942	2,801	0,6845	0,2806
0,0060	21,600	0,2190	3,056	0,7946	0,3257
0,0065	23,400	0,2295	3,310	0,9123	0,3740
0,0070	25,200	0,2472	3,565	1,0383	0,4257
0,0075	27,000	0,2648	3,819	1,1717	0,4804
0,0080	28,800	0,2825	4,074	1,3137	0,5386
0,0085	30,600	0,3002	4,329	1,4637	0,6001
0,0090	32,400	0,3178	4,583	1,6210	0,6646
0,0095	34,200	0,3355	4,838	1,7865	0,7324
0,0100	36,000	0,3531	5,093	1,9607	0,8038
0,0105	37,800	0,3708	5,347	2,1418	0,8781
0,0110	39,600	0,3885	5,602	2,3317	0,9560
0,0115	41,400	0,4061	5,857	2,5291	1,0369
0,0120	43,200	0,4238	6,111	2,7343	1,1210
0,0125	45,000	0,4414	6,366	2,9480	1,2086
0,0130	46,800	0,4591	6,621	3,1696	1,2995
0,0135	48,600	0,4768	6,875	3,3983	1,3933
0,0140	50,400	0,4944	7,130	3,6359	1,4907
0,0145	52,200	0,5121	7,384	3,8804	1,5909
0,0150	54,000	0,5297	7,639	4,1340	1,6949

D = 0m,054, S = 0mq,002290, a = 0,000682, b = 0,000575.

Volumes écoulés par 1″.	Volumes écoulés par heure.	Volumes en pieds cubes anglais par 1″.	Vitesses moyennes par 1″.	Pertes de charge Air.	Pertes de charge Gaz.
0,0005	1,800	0,0176	0,218	0,0167	0,0068
0,0010	3,600	0,0353	0,436	0,0387	0,0158
0,0015	5,400	0,0529	0,655	0,0661	0,0271
0,0020	7,200	0,0706	0,873	0,0986	0,0404
0,0025	9,000	0,0883	1,091	0,1363	0,0559
0,0030	10,800	0,1059	1,310	0,1795	0,0735
0,0035	12,600	0,1236	1,528	0,2272	0,0931
0,0040	14,400	0,1412	1,746	0,2811	0,1152
0,0045	16,200	0,1589	1,965	0,3400	0,1394
0,0050	18,000	0,1766	2,183	0,4039	0,1656
0,0055	19,800	0,1942	2,402	0,4734	0,1943
0,0060	21,600	0,2190	2,620	0,5478	0,2246
0,0065	23,400	0,2295	2,838	0,6274	0,2572
0,0070	25,200	0,2472	3,056	0,7122	0,2920
0,0075	27,000	0,2648	3,275	0,8027	0,3291
0,0080	28,800	0,2825	3,493	0,8980	0,3681
0,0085	30,600	0,3002	3,712	0,9991	0,4096
0,0090	32,400	0,3178	3,930	1,1046	0,4528
0,0095	34,200	0,3355	4,148	1,2156	0,4983
0,0100	36,000	0 3531	4,366	1,3321	0,5461

D = 0m,054, S = 0mq,002290, a = 0,000682, b = 0,000575 (*suite*).

Volumes écoulés par 1″.	Volumes écoulés par heure.	Volumes en pieds cubes anglais par 1″.	Vitesses moyennes par 1″.	Pertes de charge pour 1000 mèt. en hauteur d'eau. Air.	Pertes de charge pour 1000 mèt. en hauteur d'eau. Gaz.
m. cub.	m. cub.	p. cub.	mèt.	mèt.	mèt.
0,0105	37,800	0,3708	4,585	1,4541	0,5961
0,0110	39,600	0,3885	4,803	1,5810	0,6482
0,0115	41,400	0,4061	5,022	1,7135	0,7025
0,0120	43,200	0,4238	5,240	1,8507	0,7587
0,0125	45,000	0,4414	5,485	1,9931	0,8171
0,0130	46,800	0,4591	5,677	2,1415	0,8780
0,0135	48,600	0,4768	5,895	2,3144	0,9489
0,0140	50,400	0,4944	6,113	2,4526	1,0055
0,0145	52,200	0,5121	6,332	2,6165	1,0727
0,0150	54,000	0,5297	6,550	2,7852	1,1419

D = 0m,081, S = 0mq,005153, a = 0,000589, b = 0,000489.

Volumes écoulés par 1″.	Volumes écoulés par heure.	Volumes en pieds cubes anglais par 1″.	Vitesses moyennes par 1″.	Pertes de charge Air.	Pertes de charge Gaz.
0,001	3,600	0,0353	0,194	0,0083	0,0034
0,002	7,200	0,0706	0,388	0,0189	0,0077
0,003	10,800	0,1059	0,582	0,0320	0,0131
0,004	14,400	0,1412	0,776	0,0473	0,0193
0 005	18,000	0,1766	0,970	0,0650	0,0266
0,006	21,600	0,2190	1,164	0,0850	0,0348
0,007	25,200	0,2472	1,358	0,1074	0,0440
0,008	28,800	0,2825	1,552	0,1320	0,0541
0,009	32,400	0,3178	1,746	0,1590	0,0652
0,010	36,000	0,3532	1,940	0,1884	0,0772
0,011	39,600	0,3885	2,134	0,2201	0,0902
0,012	43,200	0,4238	2,328	0,2541	0,1042
0,013	46,800	0,4591	2,522	0,2904	0,1190
0,014	50,400	0,4944	2,711	0,3281	0,1345
0,015	54,000	0,5297	2,910	0,3701	0,1517
0,016	57,600	0,5650	3,105	0,4137	0,1696
0,017	61,200	0,6004	3,299	0,4593	0,1883
0,018	64,800	0,6357	3,493	0,5074	0,2080
0,019	68,400	0,6710	3,687	0,5577	0,2286
0,020	72,000	0,7063	3,881	0,6104	0,2502
0,021	75,600	0,7417	4,075	0,6655	0,2728
0,022	79,200	0,7770	4,269	0,7227	0,2963
0,023	82,800	0,8123	4,463	0,7825	0,3208
0,024	86,400	0,8476	4,657	0,8446	0,3462
0,025	90,000	0,8829	4,851	0,9088	0,3726
0,026	93,600	0,9182	5,045	0,9755	0,3999
0,027	97,200	0,9536	5,239	1,0446	0,4282
0,028	100,800	0,9889	5,434	1,1164	0,4577
0,029	104,400	1,0244	5,627	1,1896	0,4877
0,030	108,000	1,0595	5,822	1,2659	0,5188
0,031	111,600	1,0948	6,016	1,3444	0,5512
0,032	115,200	1,1301	6,210	1,4250	0,5842
0,033	118,800	1,1655	6,554	1,5739	0,6153
0,034	122,400	1,2008	6,598	1,5935	0,6533
0,035	126,000	1,2361	6,792	1,6813	0,6893
0,036	129,600	1,2714	6,986	1,7712	0,7262
0,037	133,200	1,3067	7,180	1,8636	0,7640
0,038	136,800	1,3421	7,374	1,9582	0,8028
0,039	140,400	1,3774	7,568	2,0553	0,8422
0,040	144,000	1,4127	7,762	2,1548	0,8834

D=0m,100, S=0mq,007853, a=0,000550, b=0,000475.						D=0m,108, S=0mq,009160, a=0,000530, b=0,000460.					
VOLUMES ÉCOULÉS		VOLUMES en pieds cubes anglais par 1″	Vitesses moyennes par 1″.	PERTES DE CHARGE pour 1000 mèt. en hauteur d'eau.		VOLUMES ÉCOULÉS		VOLUMES en pieds cubes anglais par 1″	Vitesses moyennes par 1″.	PERTES DE CHARGE pour 1000 mèt. en hauteur d'eau.	
par 1″	par heure.			Air	Gaz.	par 1″	par heure.			Air.	Gaz.
m. cub.	m. cub.	p. cub.	mèt.	mèt.	mèt.	m. cub.	m. cub.	p. cub.	mèt.	mèt.	mèt.
0,001	3,600	0,0353	0,127	0,0040	0,0016	0,001	3,600	0,0353	0,109	0,0030	0,0012
0,002	7,200	0,0706	0,254	0,0088	0,0036	0,002	7,200	0,0706	0,218	0,0065	0,0026
0,003	10,800	0,1059	0,382	0,0143	0,0058	0,003	10,800	0,1059	0,327	0,0104	0,0042
0,004	14,400	0,1412	0,509	0,0208	0,0085	0,004	14,400	0,1413	0,436	0,0150	0,0061
0,005	18,000	0,1766	0,636	0,0280	0,0115	0,005	18,000	0,1766	0,545	0,0201	0,0082
0,006	21,600	0,2190	0,763	0,0360	0,0147	0,006	21,600	0,2190	0,655	0,0257	0,0105
0,007	25,200	0,2472	0,891	0,0447	0,0183	0,007	25,200	0,2472	0,764	0,0319	0,0130
0,008	28,800	0,2825	1,018	0,0544	0,0223	0,008	28,800	0,2825	0,873	0,0385	0,0157
0,009	32,400	0,3178	1,145	0,0647	0,0265	0,009	32,400	0,3178	0,982	0,0457	0,0187
0,010	36,000	0,3532	1,273	0,0759	0,0311	0,010	36,000	0,3532	1,091	0,0535	0,0219
0,011	39,600	0,3885	1,400	0,0879	0,0360	0,011	39,600	0,3885	1,200	0,0617	0,0253
0,012	43,200	0,4238	1,528	0,1005	0,0412	0,012	43,200	0,4238	1,309	0,0707	0,0289
0,013	46,800	0,4591	1,655	0,1142	0,0468	0,013	46,800	0,4591	1,419	0,0797	0,0326
0,014	50,400	0,4944	1,782	0,1285	0,0527	0,014	50,400	0,4944	1,528	0,0895	0,0366
0,015	54,000	0,5297	1,909	0,1436	0,0588	0,015	54,000	0,5297	1,637	0,0998	0,0409
0,016	57,600	0,5651	2,036	0,1595	0,0654	0,016	57,600	0,5651	1,746	0,1110	0,0455
0,017	61,200	0,6004	2,164	0,1764	0,0723	0,017	61,200	0,6004	1,855	0,1227	0,0503
0,018	64,800	0,6357	2,290	0,1937	0,0794	0,018	64,800	0,6357	1,964	0,1343	0,0550
0,019	68,400	0,6710	2,419	0,2123	0,0870	0,019	68,400	0,6710	2,074	0,1464	0,0600
0,020	72,000	0,7063	2,546	0,2313	0,0948	0,020	72,000	0,7063	2,183	0,1593	0,0653
0,021	75,600	0,7417	2,674	0,2513	0,1030	0,021	75,600	0,7417	2,292	0,1728	0,0708
0,022	79,200	0,7770	2,800	0,2718	0,1114	0,022	79,200	0,7770	2,400	0,1867	0,0765
0,023	82,800	0,8123	2,928	0,2917	0,1196	0,023	82,800	0,8123	2,510	0,2013	0,0825
0,024	86,400	0,8476	3,056	0,3158	0,1294	0,024	86,400	0,8476	2,619	0,2168	0,0888
0,025	90,000	0,8829	3,182	0,3387	0,1388	0,025	90,000	0,8829	2,729	0,2330	0,0955
0,026	93,600	0,9182	3,310	0,3665	0,1502	0,026	93,600	0,9182	2,878	0,2485	0,1018
0,027	97,200	0,9536	3,435	0,3869	0,1586	0,027	97,200	0,9536	2,947	0,2647	0,1085
0,028	100,800	0,9889	3,564	0,4137	0,1696	0,028	100,800	0,9889	3,056	0,2817	0,1154
0,029	104,400	1,0242	3,692	0,4391	0,1800	0,029	104,400	1,0242	3,165	0,2995	0,1227
0,030	108,000	1,0595	3,819	0,4661	0,1911	0,030	108,000	1,0595	3,274	0,3176	0,1302
0,031	111,600	1,0948	3,947	0,4941	0,2025	0,031	111,600	1,0948	3,383	0,3362	0,1378
0,032	115,200	1,1301	4,072	0,5225	0,2142	0,032	115,200	1,1301	3,492	0,3555	0,1457
0,033	118,800	1,1655	4,200	0,5518	0,2262	0,033	118,800	1,1655	3,600	0,3752	0,1538
0,034	122,400	1,2008	4,328	0,5822	0,2387	0,034	122,400	1,2008	3,710	0,3955	0,1621
0,035	126,000	1,2361	4,456	0,6134	0,2515	0,035	126,000	1,2361	3,820	0,4162	0,1706
0,036	129,600	1,2714	4,580	0,6444	0,2642	0,036	129,600	1,2714	3,928	0,4376	0,1794
0,037	133,200	1,3067	4,711	0,6779	0,2779	0,037	133,200	1,3067	4,039	0,4596	0,1884
0,038	136,800	1,3421	4,838	0,7113	0,2916	0,038	136,800	1,3421	4,148	0,4822	0,1977
0,039	140,400	1,3774	4,965	0,7454	0,3056	0,039	140,400	1,3774	4,257	0,5051	0,2071
0,040	144,000	1,4127	5,092	0,7803	0,3199	0,040	144,000	1,4127	4,366	0,5284	0,2166
0,041	147,600	1,4480	5,220	0,8163	0,3346	0,041	147,600	1,4480	4,475	0,5523	0,2264
0,042	151,200	1,4833	5,348	0,8531	0,3497	0,042	151,200	1,4833	4,584	0,5768	0,2365
0,043	154,800	1,5186	5,475	0,8903	0,3650	0,043	154,800	1,5186	4,694	0,6025	0,2470
0,044	158,400	1,5540	5,600	0,9279	0,3804	0,044	158,400	1,5540	4,800	0,6288	0,2578
0,045	162,000	1,5893	5,729	0,9659	0,3960	0,045	162,000	1,5893	4,910	0,6542	0,2682
0,046	165,600	1,6246	5,856	1,0043	0,4117	0,046	165,600	1,6246	5,021	0,6801	0,2788
0,047	169,200	1,6599	5,984	1,0478	0,4296	0,047	169,200	1,6599	5,130	0,7070	0,2898
0,048	172,800	1,6965	6,112	1,0893	0,4466	0,048	172,800	1,6952	5,238	0,7345	0,3011
0,049	176,400	1,7306	6,239	1,1314	0,4638	0,049	176,400	1,7306	5,348	0,7630	0,3128
0,050	180,000	1,7659	6,365	1,1738	0,4812	0,050	180,000	1,7659	5,458	0,7919	0,3246
0,055	198,000	1,9425	7,003	1,4009	0,5743	0,055	198,000	1,9425	6,004	0,9431	0,3866
0,060	216,000	2,1190	7,630	1,6438	0,6739	0,060	216,000	2,1190	6,550	1,1075	0,4540
0,065	234,000	2,2956	8,277	1,9141	0,7847	0,065	234,000	2,2956	7,096	1,2851	0,5269
0,070	252,000	2,4722	8,910	2,1989	0,9015	0,070	252,000	2,4722	7,640	1,4751	0,6047

D=0m,135, S=0mq,014313, a=0,000470, b=0,000442.

VOLUMES ÉCOULÉS par 1″	VOLUMES ÉCOULÉS par heure.	VOLUMES en pieds cubes anglais par 1″	Vitesses moyennes par 1″.	PERTES DE CHARGE pour 1000 mèt. en hauteur d'eau. Air.	PERTES DE CHARGE pour 1000 mèt. en hauteur d'eau. Gaz.
m. cub.	m. cub.	p. cub.	mèt.	mèt.	mèt.
0,001	3,600	0,0353	0,069	0,0013	0,0005
0,002	7,200	0,0706	0,139	0,0028	0,0011
0,003	10,800	0,1059	0,209	0,0045	0,0018
0,004	14,400	0,1412	0,279	0,0063	0,0026
0,005	18,000	0,1766	0,349	0,0083	0,0034
0,006	21,600	0,2190	0,419	0,0104	0,0042
0,007	25,200	0,2472	0,489	0,0127	0,0052
0,008	28,800	0,2825	0,559	0,0152	0,0062
0,009	32,400	0,3178	0,628	0,0179	0,0073
0,010	36,000	0,3532	0,698	0,0208	0,0085
0,011	39,600	0,3885	0,768	0,0237	0,0097
0,012	43,200	0,4238	0,838	0,0269	0,0110
0,013	46,800	0,4591	0,908	0,0302	0,0123
0,014	50,400	0,4944	0,978	0,0337	0,0138
0,015	54,000	0,5297	1,048	0,0374	0,0153
0,016	57,600	0,5651	1,118	0,0412	0,0169
0,017	61,200	0,6004	1,187	0,0451	0,0185
0,018	64,800	0,6357	1,257	0,0493	0,0202
0,019	68,400	0,6710	1,327	0,0535	0,0219
0,020	72,000	0,7063	1,397	0,0581	0,0238
0,022	79,200	0,7770	1,537	0,0675	0,0276
0,024	86,400	0,8476	1,676	0,0774	0,0317
0,026	93,600	0,9182	1,816	0,0883	0,0362
0,028	100,800	0,9889	1,956	0,0998	0,0409
0,030	108,000	1,0595	2,096	0,1118	0,0458
0,032	115,200	1,1301	2,236	0,1247	0,0511
0,034	122,400	1,2008	2,375	0,1378	0,0565
0,036	129,600	1,2714	2,515	0,1521	0,0623
0,038	136,800	1,3421	2,655	0,1670	0,0684
0,040	144,000	1,4127	2,794	0,1823	0,0747
0,042	151,200	1,4833	2,934	0,1981	0,0812
0,044	158,400	1,5540	3,074	0,2152	0,0882
0,046	165,600	1,6246	3,214	0,2323	0,0952
0,048	172,800	1,6952	3,353	0,2503	0,1026
0,050	180,000	1,7659	3,493	0,2690	0,1103
0,052	187,200	1,8365	3,633	0,2883	0,1182
0,054	194,400	1,9071	3,772	0,3083	0,1264
0,056	201,600	1,9778	3,912	0,3290	0,1349
0,058	208,800	2,0484	4,052	0,3504	0,1436
0,060	216,000	2,1190	4,192	0,3724	0,1526
0,062	223,200	2,1897	4,331	0,3948	0,1618
0,064	230,400	2,2603	4,471	0,4182	0,1714
0,066	237,600	2,3310	4,611	0,4423	0,1813
0,068	244,800	2,4016	4,751	0,4670	0,1914
0,070	252,000	2,4722	4,890	0,4923	0,2018
0,072	259,200	2,5429	5,030	0,5180	0,2123
0,074	266,400	2,6135	5,170	0,5448	0,2233
0,076	273,600	2,6841	5,309	0,5723	0,2346
0,078	280,800	2,7548	5,449	0,6002	0,2460
0,080	288	2,8254	5,589	0,6295	0,2581
0,090	324	3,1786	6,280	0,7795	0,3196
0,100	360	3,5318	6,980	0,9499	0,3894
0,110	396	3,8849	7,680	1,1349	0,4653
0,120	432	4,2381	8,380	1,3375	0,5484

D=0m,150, S=0mq,017671, a=0,000440, b=0,000430.

VOLUMES ÉCOULÉS par 1″	VOLUMES ÉCOULÉS par heure.	VOLUMES en pieds cubes anglais par 1″	Vitesses moyennes par 1″.	PERTES DE CHARGE pour 1000 mèt. en hauteur d'eau. Air.	PERTES DE CHARGE pour 1000 mèt. en hauteur d'eau. Gaz.
m. cub.	m. cub.	p. cub.	mèt.	mèt.	mèt.
0,001	3,600	0,0353	0,056	0,0009	0,0004
0,002	7,200	0,0706	0,113	0,0019	0,0008
0,003	10,800	0,1059	0,169	0,0029	0,0012
0,004	14,400	0,1412	0,226	0,0040	0,0016
0,005	18,000	0,1766	0,282	0,0054	0,0022
0,006	21,600	0,2190	0,339	0,0066	0,0027
0,007	25,200	0,2472	0,396	0,0083	0,0034
0,008	28,800	0,2825	0,452	0,0096	0,0039
0,009	32,400	0,3178	0,509	0,0114	0,0046
0,010	36,000	0,3532	0,565	0,0130	0,0053
0,011	39,600	0,3885	0,622	0,0151	0,0062
0,012	43,200	0,4238	0,679	0,0168	0,0069
0,013	46,800	0,4591	0,735	0,0191	0,0078
0,014	50,400	0,4944	0,792	0,0209	0,0086
0,015	54,000	0,5297	0,848	0,0234	0,0096
0,016	57,600	0,5651	0,905	0,0255	0,0104
0,017	61,200	0,6004	0,962	0,0283	0,0116
0,018	64,800	0,6357	1,018	0,0305	0,0125
0,019	68,400	0,6710	1,075	0,0334	0,0137
0,020	72,000	0,7063	1,132	0,0361	0,0148
0,022	79,200	0,7770	1,245	0,0418	0,0171
0,024	86,400	0,8476	1,358	0,0484	0,0198
0,026	93,600	0,9182	1,471	0,0544	0,0223
0,028	100,800	0,9889	1,584	0,0613	0,0251
0,030	108,000	1,0595	1,692	0,0684	0,0280
0,032	115,200	1,1301	1,811	0,0763	0,0312
0,034	122,400	1,2008	1,924	0,0841	0,0344
0,036	129,600	1,2714	2,037	0,0927	0,0380
0,038	136,800	1,3421	2,150	0,1013	0,0415
0,040	144,000	1,4127	2,263	0,1107	0,0453
0,042	151,200	1,4833	2,376	0,1203	0,0493
0,044	158,400	1,5540	2,490	0,1303	0,0534
0,046	165,600	1,6246	2,603	0,1406	0,0576
0,048	172,800	1,6952	2,716	0,1513	0,0620
0,050	180	1,7659	2,829	0,1624	0,0665
0,055	198	1,9425	3,112	0,1919	0,0787
0,060	216	2,1190	3,395	0,2238	0,0917
0,065	234	2,2956	3,678	0,2580	0,1057
0,070	252	2,4722	3,961	0,2947	0,1208
0,075	270	2,6488	4,244	0,3338	0,1368
0,080	288	2,8254	4,527	0,3754	0,1539
0,085	306	3,0020	4,810	0,4191	0,1718
0,090	324	3,1786	5,093	0,4656	0,1909
0,095	342	3,3552	5,376	0,5141	0,2107
0,100	360	3,5318	5,659	0,5651	0,2317
0,105	378	3,7084	5,941	0,6181	0,2534
0,110	396	3,8849	6,224	0,6744	0,2765
0,115	414	4,0615	6,507	0,7327	0,3004
0,120	432	4,2381	6,790	0,7934	0,3253
0,125	450	4,4147	7,073	0,8564	0,3511
0,130	468	4,5913	7,356	0,9219	0,3780
0,140	504	4,9445	7,922	1,0602	0,4346
0,150	540	5,2977	8,488	1,2080	0,4952
0,160	576	5,6508	9,054	1,3654	0,5598

$D = 0^{m},162$, $S = 0^{mq},020612$, $a = 0,000410$, $b = 0,000420$.

VOLUMES ÉCOULÉS		VOLUMES en pieds cubes anglais par 1″	Vitesses moyennes par 1″	PERTES DE CHARGE pour 1000 mèt. en hauteur d'eau.	
par 1″	par heure.			Air.	Gaz.
m. cub.	m. cub.	p. cub.	mèt.	mèt.	mèt.
0,001	3,600	0,0353	0,048	0,0006	0,0002
0,002	7,200	0,0706	0,097	0,0013	0,0005
0,003	10,800	0,1059	0,148	0,0021	0,0008
0,004	14,400	0,1412	0,194	0,0030	0,0012
0,005	18,000	0,1766	0,242	0,0038	0,0015
0,006	21,600	0,2190	0,291	0,0049	0,0020
0,007	25,200	0,2472	0,339	0,0059	0,0024
0,008	28,800	0,2825	0,388	0,0070	0,0028
0,009	32,400	0,3178	0,436	0,0082	0,0033
0,010	36,000	0,3532	0,485	0,0094	0,0038
0,011	39,600	0,3885	0,533	0,0107	0,0044
0,012	43,200	0,4238	0,582	0,0121	0,0049
0,013	46,800	0,4591	0,630	0,0135	0,0055
0,014	50,400	0,4944	0,679	0,0150	0,0061
0,015	54,000	0,5297	0,727	0,0165	0,0067
0,016	57,600	0,5651	0,776	0,0181	0,0074
0,017	61,200	0,6004	0,824	0,0197	0,0081
0,018	64,800	0,6357	0,873	0,0215	0,0088
0,019	68,400	0,6710	0,922	0,0233	0,0095
0,020	72,000	0,7063	0,970	0,0252	0,0103
0,022	79,200	0,7770	1,067	0,0292	0,0120
0,024	86,400	0,8476	1,164	0,0332	0,0136
0,026	93,600	0,9182	1,261	0,0377	0,0154
0,028	100,800	0,9889	1,358	0,0423	0,0173
0,030	108,000	1,0595	1,455	0,0473	0,0194
0,032	115,200	1,1301	1,552	0,0524	0,0215
0,034	122,400	1,2008	1,649	0,0579	0,0237
0,036	129,600	1,2714	1,746	0,0635	0,0260
0,038	136,800	1,3421	1,843	0,0694	0,0284
0,040	144,000	1,4127	1,940	0,0756	0,0310
0,042	151,200	1,4833	2,037	0,0821	0,0336
0,044	158,400	1,5540	2,134	0,0887	0,0363
0,046	165,600	1,6246	2,231	0,0982	0,0402
0,048	172,800	1,6952	2,328	0,1078	0,0442
0,050	180,000	1,7659	2,425	0,1103	0,0452
0,055	198	1,9425	2,668	0,1300	0,0533
0,060	216	2,1190	2,910	0,1513	0,0620
0,065	234	2,2956	3,153	0,1741	0,0714
0,070	252	2,4722	3,396	0,1995	0,0818
0,075	270	2,6488	3,638	0,2249	0,0922
0,080	288	2,8254	3,881	0,2531	0,1037
0,085	306	3,0020	4,123	0,2814	0,1153
0,090	324	3,1786	4,366	0,3129	0,1283
0,095	342	3,3552	4,609	0,3445	0,1412
0,100	360	3,5318	4,851	0,3791	0,1554
0,105	378	3,7084	5,094	0,4139	0,1697
0,110	396	3,8849	5,336	0,4517	0,1852
0,115	414	4,0615	5,579	0,4895	0,2007
0,120	432	4,2381	5,821	0,5305	0,2175
0,125	450	4,4147	6,064	0,5715	0,2343
0,150	540	5,2977	7,276	0,8039	0,3286
0,175	630	6,1806	8,511	1,0812	0,4433
0,200	720	7,0636	9,702	1,3874	0,5688
0,225	810	7,9465	10,915	1,7383	0,7127

$D = 0^{m},189$, $S = 0^{mq},028055$, $a = 0,000355$, $b = 0,000405$.

VOLUMES ÉCOULÉS		VOLUMES en pieds cubes anglais par 1″	Vitesses moyennes par 1″	PERTES DE CHARGE pour 1000 mèt. en hauteur d'eau.	
par 1″	par heure.			Air.	Gaz.
m. cub.	m. cub.	p. cub.	mèt.	mèt.	mèt.
0,001	3,600	0,0353	0,035	0,0003	0,0001
0,002	7,200	0,0706	0,071	0,0007	0,0003
0,003	10,800	0,1059	0,106	0,0011	0,0005
0,004	14,400	0,1412	0,142	0,0015	0,0006
0,005	18,000	0,1766	0,178	0,0020	0,0008
0,006	21,600	0,2190	0,214	0,0025	0,0010
0,007	25,200	0,2472	0,249	0,0031	0,0013
0,008	28,800	0,2825	0,285	0,0036	0,0015
0,009	32,400	0,3178	0,321	0,0042	0,0017
0,010	36,000	0,3532	0,356	0,0048	0,0019
0,015	54	0,5297	0,534	0,0083	0,0034
0,020	72	0,7063	0,713	0,0127	0,0052
0,025	90	0,8829	0,891	0,0173	0,0071
0,030	108	1,0595	1,069	0,0231	0,0095
0,035	126	1,2361	1,247	0,0291	0,0119
0,040	144	1,4127	1,425	0,0364	0,0149
0,045	162	1,5893	1,604	0,0438	0,0179
0,050	180	1,7659	1,782	0,0524	0,0215
0,055	198	1,9425	1,960	0,0612	0,0251
0,060	216	2,1190	2,138	0,0713	0,0292
0,065	234	2,2956	2,318	0,0815	0,0334
0,070	252	2,4722	2,495	0,0929	0,0381
0,075	270	2,6488	2,673	0,1044	0,0428
0,080	288	2,8254	2,851	0,1172	0,0480
0,085	306	3,0020	3,029	0,1302	0,0534
0,090	324	3,1786	3,208	0,1443	0,0591
0,095	342	3,3522	3,386	0,1589	0,0649
0,100	360	3,5318	3,564	0,1742	0,0714
0,105	378	3,7084	3,742	0,1903	0,0780
0,110	396	3,8849	3,921	0,2071	0,0849
0,115	414	4,0615	4,099	0,2248	0,0921
0,120	432	4,2381	4,277	0,2427	0,0995
0,125	450	4,4147	4,445	0,2618	0,1073
0,130	468	4,5913	4,633	0,2810	0,1152
0,135	486	4,7679	4,812	0,3016	0,1236
0,140	504	4,9445	4,990	0,3223	0,1321
0,145	522	5,1211	5,168	0,3442	0,1411
0,150	540	5,2977	5,346	0,3662	0,1501
0,155	558	5,4742	5,525	0,3894	0,1596
0,160	576	5,6508	5,703	0,4130	0,1693
0,165	594	5,8274	5,881	0,4376	0,1794
0,170	612	6,0040	6,059	0,4626	0,1896
0,175	630	6,1806	6,237	0,4886	0,2003
0,180	648	6,3572	6,416	0,5150	0,2111
0,185	666	6,5338	6,594	0,5423	0,2223
0,190	684	6,7104	6,772	0,5701	0,2327
0,195	702	6,8870	6,950	0,5987	0,2454
0,200	720	7,0636	7,129	0,6282	0,2575
0,210	756	7,4168	7,484	0,6887	0,2823
0,220	792	7,7698	7,842	0,7525	0,3085
0,230	828	8,1230	8,198	0,8187	0,3356
0,240	864	8,4762	8,554	0,8878	0,3640
0,250	900	8,8294	8,890	0,9555	0,3917
0,260	936	9,1826	9,266	1,0343	0,4240

D = 0^{m},200, S = 0^{mq},031416, a = 0,000330, b = 0,000395.

Volumes écoulés par 1″.	Volumes écoulés par heure.	Volumes en pieds cubes anglais par 1″.	Vitesses moyennes par 1″.	Pertes de charge pour 1000 mèt. en hauteur d'eau. Air.	Pertes de charge pour 1000 mèt. en hauteur d'eau. Gaz.
m.cub.	m.cub.	p.cub.	mèt.	mèt.	mèt.
0,001	3,600	0,0353	0,032	0,0003	0,0001
0,002	7,200	0,0706	0,063	0,0005	0,0002
0,003	10,800	0,1059	0,095	0,0009	0,0004
0,004	14,400	0,1412	0,127	0,0012	0,0005
0,005	18,000	0,1766	0,159	0,0015	0,0006
0,006	21,600	0,2190	0,191	0,0019	0,0008
0,007	25,200	0,2472	0,223	0,0023	0,0009
0,008	28,800	0,2825	0,254	0,0028	0,0011
0,009	32,400	0,3178	0,286	0,0032	0,0013
0,010	36,000	0,3532	0,318	0,0037	0,0015
0,015	54	0,5297	0,477	0,0049	0,0020
0,020	72	0,7063	0,636	0,0063	0,0026
0,025	90	0,8829	0,795	0,0116	0,0047
0,030	108	1,0595	0,954	0,0172	0,0070
0,035	126	1,2361	1,114	0,0219	0,0090
0,040	144	1,4127	1,273	0,0270	0 0110
0,045	162	1,5893	1,432	0,0326	0,0143
0,050	180	1,7659	1,591	0,0388	0,0159
0,055	198	1,9425	1,750	0,0455	0,0186
0,060	216	2,1190	1,911	0,0527	0,0216
0,065	234	2,2956	2,069	0,0604	0,0247
0,070	252	2,4722	2,228	0,0685	0,0281
0,075	270	2,6488	2,387	0,0773	0,0317
0,080	288	2,8254	2,547	0,0864	0,0354
0,085	306	3,0020	2,706	0,0962	0,0394
0,090	324	3,1786	2,865	0,1064	0,0436
0,095	342	3,3552	3,024	0,1171	0,0480
0,100	360	3,5318	3,183	0,1283	0,0526
0,105	378	3,7084	3,343	0,1401	0,0574
0,110	396	3,8849	3,502	0,1524	0,0625
0,115	414	4,0615	3,661	0,1652	0,0677
0,120	432	4,2381	3,823	0,1786	0,0732
0,125	450	4,4147	3,978	0,1922	0,0788
0,130	468	4,5913	4,138	0,2064	0,0846
0,135	486	4,7679	4,298	0,2212	0,0907
0,140	504	4,9445	4,457	0,2365	0,0970
0,145	522	5,1211	4,616	0,2521	0,1033
0,150	540	5,2977	4,774	0,2685	0,1100
0,155	558	5,4742	4,935	0,2854	0,1170
0,160	576	5,6508	5,094	0,3027	0,1241
0,165	594	5,8274	5,253	0,3205	0,1314
0,170	612	6,0040	5,412	0,3389	0,1389
0,175	630	6,1806	5,570	0,3577	0,1466
0,180	648	6,3572	5,731	0,3771	0,1546
0,185	666	6,5338	5,890	0,3969	0,1627
0,190	684	6,7104	6,049	0,4174	0,1711
0,195	702	6,8870	6,208	0,4371	0,1792
0,200	720	7,0635	6,366	0,4594	0,1883
0,210	756	7,4168	6,686	0,5039	0,2066
0,220	792	7,7698	7,004	0,5501	0,2255
0,230	828	8,1230	7,322	0,5983	0,2453
0,240	864	8,4762	7,646	0,6496	0,2663
0,250	900	8,8294	7,956	0,7006	0,2872
0,260	936	9,1826	8,276	0,7543	0,3092

D = 0^{m},216, S = 0^{mq},036644, a = 0,000300, b = 0,000382.

Volumes écoulés par 1″.	Volumes écoulés par heure.	Volumes en pieds cubes anglais par 1″.	Vitesses moyennes par 1″.	Pertes de charge pour 1000 mèt. en hauteur d'eau. Air.	Pertes de charge pour 1000 mèt. en hauteur d'eau. Gaz.
m.cub.	m. cub.	p.cub.	mèt.	mèt.	mèt.
0,001	3,600	0,0353	0,027	0,0002	0,0001
0,002	7,200	0,0706	0,054	0,0004	0,0002
0,003	10,800	0,1059	0,081	0,0006	0,0003
0,004	14,400	0,1412	0,109	0,0009	0,0004
0,005	18,000	0,1766	0,136	0,0011	0,0005
0,006	21,600	0,2190	0,163	0,0014	0,0006
0,007	25,200	0,2472	0,191	0,0017	0,0007
0,008	28,800	0,2825	0,218	0,0020	0,0008
0,009	32,400	0,3178	0,245	0,0023	0,0009
0,010	36,000	0,3532	0,272	0,0026	0,0011
0,015	54	0,5297	0,409	0,0045	0,0018
0,020	72	0,7063	0,545	0,0065	0,0026
0,025	90	0,8829	0,685	0,0090	0,0036
0,030	108	1,0595	0,818	0,0119	0,0049
0,035	126	1,2361	0,955	0,0150	0,0061
0,040	144	1,4127	1,091	0,0185	0,0076
0,045	162	1,5893	1,228	0,0223	0,0091
0,050	180	1,7659	1,364	0,0265	0,0108
0,055	198	1,9425	1,500	0,0310	0,0127
0,060	216	2,1190	1,637	0,0359	0,0146
0,065	234	2,2956	1,773	0,0410	0,0168
0,070	252	2,4722	1,910	0,0465	0,0190
0,075	270	2,6488	2,046	0,0523	0,0214
0,080	288	2,8254	2,183	0,0586	0,0240
0,085	306	3,0020	2,319	0,0650	0,0266
0,090	324	3,1786	2,456	0,0718	0,0294
0,095	342	3,3552	2,592	0,0791	0,0324
0,100	360	3,5318	2,729	0,0866	0,0355
0,105	378	3,7083	2,865	0,0945	0,0387
0,110	396	3,8849	3,001	0,1026	0,0410
0,115	414	4,0615	3,138	0,1112	0,0456
0,120	432	4,2381	3,274	0,1200	0,0492
0,125	450	4,4147	3,411	0,1293	0,0530
0,130	468	4,5913	3,547	0,1387	0,0568
0,135	486	4,7679	3,684	0,1486	0,0609
0,140	504	4,9445	3,820	0,1588	0,0651
0,145	522	5,1211	3,957	0,1695	0,0695
0,150	540	5,2977	4,093	0,1802	0,0739
0,155	558	5,4742	4,230	0,1915	0,0785
0,160	576	5,6508	4,366	0,2029	0,0832
0,165	594	5,8274	4,502	0,2149	0,0881
0,170	612	6,0040	4,639	0,2270	0,0930
0,175	630	6,1806	4,775	0,2397	0,0983
0,180	648	6,3572	4,912	0,2525	0,1035
0,185	666	6,5338	5,048	0,2659	0,1090
0,190	684	6,7104	5,185	0,2793	0,1145
0,195	702	6,8870	5,321	0,2933	0,1202
0,200	720	7,0635	5,458	0,3073	0,1260
0,220	792	7,7698	6,002	0,3724	0,1527
0,240	864	8,4762	6,548	0,4330	0,1776
0,260	936	9,1826	7,094	0,5040	0,2066
0,280	1008	9,8890	7,640	0,5803	0,2379
0,300	1080	10,5954	8,186	0,6620	0,2714
0,320	1152	11,3016	8,732	0,7491	0,3071

D = 0m,243, S = 0mq,046377, a = 0,000257, b = 0,000362.

VOLUMES écoulés par 1″.	VOLUMES écoulés par heure.	VOLUMES en pieds cubes anglais par 1″.	Vitesses moyennes par 1″.	PERTES DE CHARGE pour 1000 mèt. en hauteur d'eau. Air.	PERTES DE CHARGE pour 1000 mèt. en hauteur d'eau. Gaz.
m. cub.	m. cub.	p. cub.	mèt.	mèt.	mèt.
0,005	18	0,1766	0,108	0,0015	0,0006
0,010	36	0,3532	0,216	0,0020	0,0008
0,015	54	0,5297	0,323	0,0025	0,0010
0,020	72	0,7063	0,431	0,0038	0,0015
0,025	90	0,8829	0,539	0,0052	0,0021
0,030	108	1,0595	0,647	0,0068	0,0028
0,035	126	1,2361	0,754	0,0085	0,0034
0,040	144	1,4127	0,862	0,0105	0,0043
0,045	162	1,5893	0,970	0,0125	0,0051
0,050	180	1,7659	1,078	0,0149	0,0061
0,055	198	1,9425	1,186	0,0173	0,0071
0,060	216	2,1190	1,293	0,0199	0,0082
0,065	234	2,2956	1,403	0,0228	0,0094
0,070	252	2,4722	1,509	0,0258	0,0105
0,075	270	2,6488	1,617	0,0290	0,0119
0,080	288	2,8254	1,725	0,0323	0,0132
0,085	306	3,0020	1,833	0,0358	0,0147
0,090	324	3,1786	1,940	0,0396	0,0162
0,095	342	3,3552	2,048	0,0435	0,0178
0,100	360	3,5318	2,156	0,0476	0,0185
0,105	378	3,7084	2,264	0,0519	0,0213
0,110	396	3,8849	2,372	0,0563	0,0231
0,115	414	4,0615	2,479	0,0609	0,0250
0,120	432	4,2381	2,587	0,0657	0,0269
0,125	450	4,4147	2,695	0,0707	0,0290
0,130	468	4,5913	2,803	0,0759	0,0311
0,135	486	4,7679	2,911	0,0812	0,0333
0,140	504	4,9445	3,018	0,0867	0,0355
0,145	522	5,1211	3,126	0,0923	0,0376
0,150	540	5,2977	3,234	0,0982	0,0402
0,155	558	5,4742	3,342	0,1044	0,0426
0,160	576	5,6508	3,450	0,1105	0,0450
0,165	594	5,8274	3,557	0,1170	0,0480
0,170	612	6,0040	3,665	0,1235	0,0506
0,175	630	6,1806	3,773	0,1303	0,0534
0,180	648	6,3572	3,881	0,1372	0,0562
0,185	666	6,5338	3,989	0,1444	0,0592
0,190	684	6,7104	4,097	0,1517	0,0622
0,195	702	6,8870	4,204	0,1592	0,0652
0,200	720	7,0635	4,312	0,1668	0,0684
0,210	756	7,4167	4,528	0,1827	0,0749
0,220	792	7,7699	4,744	0,1993	0,0817
0,230	828	8,1231	4,959	0,2166	0,0888
0,240	864	8,4763	5,175	0,2346	0,0962
0,250	900	8,8294	5,390	0,2534	0,1039
0,260	936	9,1826	5,606	0,2728	0,1118
0,270	972	9,5358	5,822	0,2930	0,1201
0,280	1008	9,8890	6,037	0,3138	0,1286
0,290	1044	10,2422	6,253	0,3354	0,1375
0,300	1080	10,5953	6,468	0,3576	0,1466
0,350	1260	12,3612	7,546	0,4799	0,1967
0,400	1440	14,1272	8,624	0,6200	0,2542
0,450	1620	15,8930	9,700	0,7777	0,3196
0,500	1800	17,6588	10,780	0,9540	0,3911

D = 0m,250, S = 0mq,049087, a = 0,000240, b = 0,000360.

VOLUMES écoulés par 1″.	VOLUMES écoulés par heure.	VOLUMES en pieds cubes anglais par 1″.	Vitesses moyennes par 1″.	PERTES DE CHARGE pour 1000 mèt. en hauteur d'eau. Air.	PERTES DE CHARGE pour 1000 mèt. en hauteur d'eau. Gaz.
m. cub.	m. cub.	p. cub.	mèt.	mèt.	mèt.
0,005	18	0,1766	0,101	0,0005	0,0002
0,010	36	0,3532	0,203	0,0013	0,0005
0,015	54	0,5297	0,305	0,0022	0,0009
0,020	72	0,7063	0,407	0,0032	0,0013
0,025	90	0,8829	0,509	0,0044	0,0018
0,030	108	1,0595	0,611	0,0057	0,0023
0,035	126	1,2361	0,713	0,0073	0,0030
0,040	144	1,4127	0,814	0,0089	0,0036
0,045	162	1,5893	0,916	0,0108	0,0044
0,050	180	1,7659	1,018	0,0127	0,0052
0,055	198	1,9425	1,120	0,0149	0,0061
0,060	216	2,1190	1,222	0,0171	0,0070
0,065	234	2,2956	1,324	0,0195	0,0080
0,070	252	2,4722	1,426	0,0221	0,0091
0,075	270	2,6488	1,527	0,0253	0,0102
0,080	288	2,8254	1,629	0,0287	0,0118
0,085	306	3,0020	1,731	0,0313	0,0128
0,090	324	3,1786	1,833	0,0340	0,0139
0,095	342	3,3552	1,935	0,0374	0,0154
0,100	360	3,5318	2,037	0,0409	0,0168
0,105	378	3,7083	2,139	0,0445	0,0182
0,110	396	3,8849	2,240	0,0483	0,0199
0,115	414	4,0615	2,342	0,0523	0,0214
0,120	432	4,2381	2,444	0,0564	0,0231
0,125	450	4,4147	2,546	0,0607	0,0247
0,130	468	4,5913	2,648	0,0651	0,0267
0,135	486	4,7679	2,750	0,0696	0,0285
0,140	504	4,9445	2,852	0,0744	0,0305
0,145	522	5,1211	2,953	0,0793	0,0325
0,150	540	5,2977	3,055	0,0848	0,0347
0,155	558	5,4742	3,157	0,0916	0,0375
0,160	576	5,6508	3,259	0,0989	0,0405
0,165	594	5,8274	3,361	0,1021	0,0418
0,170	612	6,0040	3,463	0,1060	0,0434
0,175	630	6,1806	3,565	0,1116	0,0457
0,180	648	6,3572	3,666	0,1178	0,0483
0,185	666	6,5338	3,768	0,1237	0,0507
0,190	684	6,7104	3,870	0,1302	0,0533
0,195	702	6,8869	3,972	0,1366	0,0560
0,200	720	7,0635	4,074	0,1432	0,0587
0,210	756	7,4167	4,278	0,1568	0,0643
0,220	792	7,7699	4,481	0,1710	0,0701
0,230	828	8,1231	4,685	0,1858	0,0761
0,240	864	8,4763	4,889	0,2013	0,0825
0,250	900	8,8294	5,092	0,2173	0,0891
0,260	936	9,1826	5,296	0,2340	0,0959
0,270	972	9,5358	5,500	0,2513	0,1030
0,280	1008	9,8890	5,704	0,2693	0,1104
0,290	1044	10,2422	5,907	0,2878	0,1180
0,300	1080	10,5953	6,111	0,3069	0,1258
0,350	1260	12,3612	7,130	0,4118	0,1688
0,400	1440	14,1272	8,148	0,5320	0,2181
0,450	1620	15,8930	9,165	0,6674	0,2736
0,500	1800	17,6588	10,184	0,8184	0,3855

$D = 0^m,200$, $S = 0^{mq},031416$, $a = 0,000330$, $b = 0,000395$.

VOLUMES écoulés		VOLUMES en pieds cubes anglais par 1″.	Vitesses moyennes par 1″.	PERTES DE CHARGE pour 1000 mèt. en hauteur d'eau.	
par 1″.	par heure.			Air.	Gaz.
m.cub.	m.cub.	p.cub.	mèt.	mèt.	mèt.
0,001	3,600	0,0353	0,032	0,0003	0,0001
0,002	7,200	0,0706	0,063	0,0005	0,0002
0,003	10,800	0,1059	0,095	0,0009	0,0004
0,004	14,400	0,1412	0,127	0,0012	0,0005
0,005	18,000	0,1766	0,159	0,0015	0,0006
0,006	21,600	0,2190	0,191	0,0019	0,0008
0,007	25,200	0,2472	0,223	0,0023	0,0009
0,008	28,800	0,2825	0,254	0,0028	0,0011
0,009	32,400	0,3178	0,286	0,0032	0,0013
0,010	36,000	0,3532	0,318	0,0037	0,0015
0,015	54	0,5297	0,477	0,0049	0,0020
0,020	72	0,7063	0,636	0,0063	0,0026
0,025	90	0,8829	0,795	0,0116	0,0047
0,030	108	1,0595	0,954	0,0172	0,0070
0,035	126	1,2361	1,114	0,0219	0,0090
0,040	144	1,4127	1,273	0,0270	0 0110
0,045	162	1,5893	1,432	0,0326	0,0143
0,050	180	1,7659	1,591	0,0388	0,0159
0,055	198	1,9425	1,750	0,0455	0,0186
0,060	216	2,1190	1,911	0,0527	0,0216
0,065	234	2,2956	2,069	0,0604	0,0247
0,070	252	2,4722	2,228	0,0685	0,0281
0,075	270	2,6488	2,387	0,0773	0,0317
0,080	288	2,8254	2,547	0,0864	0,0354
0,085	306	3,0020	2,706	0,0962	0,0394
0,090	324	3,1786	2,865	0,1064	0,0436
0,095	342	3,3552	3,024	0,1171	0,0480
0,100	360	3,5318	3,183	0,1283	0,0526
0,105	378	3,7084	3,343	0,1401	0,0574
0,110	396	3,8849	3,502	0,1524	0,0625
0,115	414	4,0615	3,661	0,1652	0,0677
0,120	432	4,2381	3,823	0,1786	0,0732
0,125	450	4,4147	3,978	0,1922	0,0788
0,130	468	4,5913	4,138	0,2064	0,0846
0,135	486	4,7679	4,298	0,2212	0,0907
0,140	504	4,9445	4,457	0,2365	0,0970
0,145	522	5,1211	4,616	0,2521	0,1033
0,150	540	5,2977	4,774	0,2685	0,1100
0,155	558	5,4742	4,935	0,2854	0,1170
0,160	576	5,6508	5,094	0,3027	0,1241
0,165	594	5,8274	5,253	0,3205	0,1314
0,170	612	6,0040	5,412	0,3389	0,1389
0,175	630	6,1806	5,570	0,3577	0,1466
0,180	648	6,3572	5,731	0,3771	0,1546
0,185	666	6,5338	5,890	0,3969	0,1627
0,190	684	6,7104	6,049	0,4174	0,1711
0,195	702	6,8870	6,208	0,4371	0,1792
0,200	720	7,0635	6,366	0,4594	0,1883
0,210	756	7,4168	6,686	0,5039	0,2066
0,220	792	7,7698	7,004	0,5501	0,2255
0,230	828	8,1230	7,322	0,5983	0,2453
0,240	864	8,4762	7,646	0,6496	[illegible]
0,250	900	8,8294	7,958	[illegible]	[illegible]
0,260	936	9,1820	[illegible]	[illegible]	[illegible]

$D = 0^m,216$, $S = 0^{mq},036644$, $a = 0,000300$, $b = 0,000382$.

VOLUMES ÉCOULÉS		VOLUMES en pieds cubes anglais par 1″.	Vitesses moyennes par 1″.	PERTES DE CHARGE pour 1000 mèt. en hauteur d'eau.	
par 1″.	par heure.			Air.	Gaz.
m.cub.	m. cub.	p. cub.	mèt.	mèt.	mèt.
0,001	3,600	0,0353	0,027	0,0002	0,0001
0,002	7,200	0,0706	0,054	0,0004	0,0002
0,003	10,800	0,1059	0,081	0,0006	0,0003
0,004	14,400	0,1412	0,109	0,0009	0,0004
0,005	18,000	0,1766	0,136	0,0011	0,0005
0,006	21,600	0,2190	0,163	0,0014	0,0006
0,007	25,200	0,2472	0,191	0,0017	0,0007
0,008	28,800	0,2825	0,218	0,0020	0,0008
0,009	32,400	0,3178	0,245	0,0023	0,0009
0,010	36,000	0,3532	0,272	0,0026	0,0011
0,015	54	0,5297	0,409	0,0045	0,0018
0,020	72	0,7063	0,545	0,0065	0,0026
0,025	90	0,8829	0,685	0,0090	0,0036
0,030	108	1,0595	0,818	0,0119	0,0049
0,035	126	1,2361	0,955	0,0150	0,0061
0,040	144	1,4127	1,091	0,0185	0,0076
0,045	162	1,5893	1,228	0,0223	0,0091
0,050	180	1,7659	1,364	0,0265	0,0108
0,055	198	1,9425	1,500	0,0310	0,0127
0,060	216	2,1190	1,637	0,0359	0,0146
0,065	234	2,2956	1,773	0,0410	0,0168
0,070	252	2,4722	1,910	0,0465	0,0190
0,075	270	2,6488	2,046	0,0523	0,0214
0,080	288	2,8254	2,183	0,0586	0,0240
0,085	306	3,0020	2,319	0,0650	0,0266
0,090	324	3,1786	2,456	0,0718	0,0294
0,095	342	3,3552	2,592	0,0791	0,0324
0,100	360	3,5318	2,729	0,0866	0,0355
0,105	378	3,7083	2,865	0,0945	0,0387
0,110	396	3,8849	3,001	0,1026	0,0410
0,115	414	4,0615	3,138	0,1112	0,0456
0,120	432	4,2381	3,274	0,1200	0,0492
0,125	450	4,4147	3,411	0,1293	0,0530
0,130	468	4,5913	3,547	0,1387	0,0565
0,135	486	4,7679	3,684	0,1486	0,0609
0,140	504	4,9445	3,820	0,1588	0,0651
0,145	522	5,1211	3,957	0,1695	[illegible]
0,150	540	5,2977	4,093	0,1802	[illegible]
0,155	558	5,4742	4,230	0,1915	[illegible]
0,160	576	5,6508	4,366	0,2029	[illegible]
0,165	594	5,8274	4,502	0,2149	[illegible]
0,170	612	6,0040	4,639	0,2270	[illegible]
0,175	630	6,1806	4,775	0,2397	[illegible]
0,180	648	6,3572	4,912	0,2525	[illegible]
0,185	666	6,5338	5,048	0,2659	[illegible]
0,190	684	6,7104	5,185	0,2793	[illegible]
0,195	702	6,8870	5,321	0,2933	[illegible]
0,200	720	7,0635	5,458	[illegible]	[illegible]
0,220	792	7,7698	6,002	[illegible]	[illegible]
0,240	864	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
0,260	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

D = 0m,243, S = 0m,04 63[illegible] a = 0,00[illegible] b = 0,000 36[illegible]

VOLUMES écoulés par 1".	VOLUMES écoulés par heure.	VOLUMES en pieds cubes anglais par 1".	Vitesses moyennes par 1".	Pertes de charge pour 100 mètres — Ar.
m. cub.	m. cub.	p. cub.	mèt.	mèt.
0,005	18	0,1766	0,108	[illegible]
0,010	36	0,3532	0,216	[illegible]
0,015	54	0,5297	0,323	[illegible]
0,020	72	0,7063	0,431	[illegible]
0,025	90	0,8829	0,539	[illegible]
0,030	108	1,0595	0,64[illegible]	[illegible]
0,035	126	1,2361	0,754	[illegible]
0,040	144	1,4127	0,862	[illegible]
0,045	162	1,5893	0,9[illegible]	[illegible]
0,050	180	1,7659	1,078	[illegible]
0,055	198	1,9425	1,18[illegible]	[illegible]
0,060	216	2,1190	1,29[illegible]	[illegible]
0,065	234	2,2956	1,40[illegible]	[illegible]
0,070	252	2,4722	1,509	[illegible]
0,075	270	2,6488	1,61[illegible]	[illegible]
0,080	288	2,8254	1,72[illegible]	[illegible]
0,085	306	3,0020	1,8[illegible]	[illegible]
0,090	324	3,1786	1,94[illegible]	[illegible]
0,095	342	3,3552	2,0[illegible]	[illegible]
0,100	360	3,5318	2,15[illegible]	[illegible]
0,105	378	3,7084	2,2[illegible]	[illegible]
0,110	396	3,8849	2,[illegible]	[illegible]
0,115	414	4,0615	2,4[illegible]	[illegible]
0,120	432	4,2381	2,[illegible]	[illegible]
0,125	450	4,4147	2,[illegible]	[illegible]
0,130	468	4,5913	2,[illegible]	[illegible]
0,135	486	4,7679	[illegible]	[illegible]
0,140	504	4,9445	[illegible]	[illegible]
0,145	522	5,1211	[illegible]	[illegible]
0,150	540	5,29[illegible]	[illegible]	[illegible]
0,155	558	5,4742	[illegible]	[illegible]
0,160	576	5,65[illegible]	[illegible]	[illegible]
0,165	594	5,82[illegible]	[illegible]	[illegible]
0,170	612	6,00[illegible]	[illegible]	[illegible]
0,175	630	6,1[illegible]	[illegible]	[illegible]
0,180	648	6,3[illegible]	[illegible]	[illegible]
0,185	666	6,5[illegible]	[illegible]	[illegible]
0,190	684	6,[illegible]	[illegible]	[illegible]
0,195	702	6,[illegible]	[illegible]	[illegible]
0,200	720	7,[illegible]	[illegible]	[illegible]
0,210	756	7,[illegible]	[illegible]	[illegible]
0,220	792	7,[illegible]	[illegible]	[illegible]
0,230	828	8,[illegible]	[illegible]	[illegible]
0,240	864	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	900	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	936	9,[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	972	[illegible]	[illegible]	[illegible]
0,280	1008	9,[illegible]	[illegible]	[illegible]
0,290	1044	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	1080	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	126[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

					[illegible]1
					[illegible]2
					[illegible]0
					[illegible]58
					[illegible]96
					[illegible]105
					[illegible]115
					[illegible],0125
					[illegible],0135
					0,0147
					0,0158
				[illegible]	0,0169
				[illegible]2	0,0180
				[illegible]72	0,0192
				[illegible]03	0,0207
				[illegible]568	0,0233
				[illegible],0637	0,0261
				[illegible],0711	0,0291
				0,0788	0,0323
				0,0869	0,0356
			[illegible]	0,0954	0,0391
			[illegible]2	0,1043	0,0427
			[illegible]80	0,1137	0,0466
			[illegible],988	0,1227	0,0503
			5,197	0,1335	0,0547
			5,404	0,1435	0,0588
		[illegible]6	5,612	0,1549	0,0635
		[illegible]80	5,820	0,1656	0,0679
		[illegible],4848	6,028	0,1779	0,0729
		[illegible]1,1907	6,236	0,1894	0,0776
	[illegible]	21,8970	6,444	0,2025	0,0830
	[illegible]04	22,6034	6,650	0,2153	0,0882
	[illegible]376	23,3098	6,860	0,2287	0,0938
	2448	24,0161	7,066	0,2423	0,0994
[illegible]	2520	24,7225	7,275	0,2565	0,1051
[illegible]00	2880	28,2542	8,312	0,3327	0,1364
[illegible],900	3240	31,7860	9,350	0,4189	0,1717
1,000	3600	35,3178	10,394	0,5152	0,2112
1,100	3960	38,8495	11,430	0,6214	0,2547

$D = 0^m,270$, $S = 0^{mq},057255$, $a = 0,000215$, $b = 0,000350$.

VOLUMES ÉCOULÉS par 1″.	VOLUMES ÉCOULÉS par heure.	VOLUMES en pieds cubes anglais par 1″.	Vitesses moyennes par 1″.	PERTES DE CHARGE pour 1000 mèt. en hauteur d'eau. Air.	PERTES DE CHARGE pour 1000 mèt. en hauteur d'eau. Gaz.
m. cub.	m. cub.	p. cub.	mèt.	mèt.	mèt.
0,005	18	0,1766	0,087	0,0004	0,0001
0,010	36	0,3532	0,174	0,0009	0,0004
0,015	54	0,5297	0,262	0,0014	0,0006
0,020	72	0,7063	0,349	0,0022	0,0009
0,025	90	0,8829	0,436	0,0030	0,0012
0,030	108	1,0595	0,524	0,0040	0.0016
0,035	126	1,2361	0,611	0,0050	0,0020
0,040	144	1,4127	0,698	0,0061	0,0025
0,045	162	1,5893	0,786	0,0073	0,0030
0,050	180	1,7659	0,873	0,0087	0,0035
0,055	198	1,9425	0,960	0,0101	0,0041
0,060	216	2,1190	1,048	0,0117	0,0048
0,065	234	2,2956	1,135	0,0133	0,0054
0,070	252	2,4722	1,222	0,0155	0,0063
0,075	270	2,6488	1,310	0,0178	0,0073
0,080	288	2,8254	1,397	0,0193	0,0079
0,085	306	3,0020	1,484	0,0208	0,0086
0,090	324	3,1786	1,572	0,0230	0,0094
0,095	342	3,3552	1,659	0,0252	0,0104
0,100	360	3,5318	1,746	0,0276	0,0113
0,105	378	3,7083	1,834	0,0300	0,0123
0,110	396	3,8849	1,921	0,0326	0,0133
0,115	414	4,0615	2,008	0,0352	0,0144
0,120	432	4,2381	2,096	0,0379	0,0155
0,125	450	4,4147	2,183	0,0408	0,0168
0,130	468	4,5913	2,270	0,0438	0,0180
0,135	486	4,7679	2,358	0,0469	0,0192
0,140	504	4,9445	2,445	0,0500	0,0205
0,145	522	5,1211	2,532	0,0533	0,0217
0,150	540	5,2977	2,620	0,0566	0,0233
0,155	558	5,4742	2,707	0,0602	0,0247
0,160	576	5,6508	2,794	0,0637	0,0261
0,165	594	5,8274	2,881	0,0674	0,0276
0,170	612	6,0040	2,969	0,0711	0,0291
0,175	630	6,1806	3,056	0,0751	0,0308
0,180	648	6,3572	3,144	0,0790	0,0323
0,185	666	6,5338	3,231	0,0831	0,0340
0,190	684	6,7104	3,318	0,0873	0,0357
0,195	702	6,8870	3,406	0,0917	0,0376
0,200	720	7,0635	3,493	0,0982	0,0402
0,210	756	7,4167	3,667	0,1051	0,0431
0,220	792	7,7699	3,842	0,1146	0,0470
0,230	828	8,1231	4,017	0,1245	0,0510
0,240	864	8,4763	4,191	0,1351	0,0554
0,250	900	8,8294	4,376	0,1461	0,0599
0,260	936	9,1826	4,551	0,1573	0,0645
0,270	972	9,5358	4,725	0,1689	0,0692
0,280	1008	9,8890	4,900	0,1809	0,0741
0,290	1044	10,2422	5,075	0,1933	0,0792
0,300	1080	10,5953	5,250	0,2061	0,0845
0,350	1260	12,3612	6,112	0,2753	0,1128
0,400	1440	14,1272	6,986	0,3556	0,1458
0,450	1620	15,8931	7,863	0,4464	0,1830
0,500	1800	17,6588	8,752	0,5491	0,2251

$D = 0^m,300$, $S = 0^{mq},070686$, $a = 0,000180$, $b = 0,000332$.

VOLUMES ÉCOULÉS par 1″.	VOLUMES ÉCOULÉS par heure.	VOLUMES en pieds cubes anglais par 1″.	Vitesses moyennes par 1″.	PERTES DE CHARGE pour 1000 mèt. en hauteur d'eau. Air.	PERTES DE CHARGE pour 1000 mèt. en hauteur d'eau. Gaz.
m. cub.	m. cub.	p. cub.	mèt.	mèt.	mèt.
0,010	36	0,3532	0,140	0,0004	0,0001
0,015	54	0,5298	0,212	0,0009	0,0004
0,020	72	0,7063	0,283	0,0013	0,0005
0,025	90	0,8829	0,353	0,0018	0,0007
0,030	108	1,0595	0,424	0,0023	0,0009
0,035	126	1,2361	0,495	0,0029	0,0012
0,040	144	1,4127	0,565	0,0036	0,0015
0,045	162	1,5893	0,636	0,0042	0,0017
0,050	180	1,7659	0,707	0,0050	0,0020
0,055	198	1,9425	0,778	0,0058	0,0024
0,060	216	2,1190	0,849	0,0067	0,0027
0,065	234	2,2956	0,919	0,0076	0,0031
0,070	252	2,4722	0,990	0,0086	0,0035
0,075	270	2,6488	1,061	0,0097	0,0039
0,080	288	2,8254	1,131	0,0108	0,0044
0,085	306	3,0020	1,202	0,0120	0,0049
0,090	324	3,1786	1,273	0,0132	0,0054
0,095	342	3,3552	1,344	0,0144	0,0059
0,100	360	3,5318	1,414	0,0157	0,0064
0,105	378	3,7084	1,485	0,0171	0,0070
0,110	396	3,8849	1,556	0,0186	0,0076
0,115	414	4,0615	1,627	0,0201	0,0082
0,120	432	4,2381	1,697	0,0216	0,0088
0,125	450	4,4147	1,768	0,0233	0,0095
0,130	468	4,5913	1,839	0,0250	0,0102
0,135	486	4,7679	1,910	0,0267	0,0109
0,140	504	4,9445	1,980	0,0285	0,0117
0,145	522	5,1211	2,051	0,0303	0,0124
0,150	540	5,2977	2,122	0,0322	0,0132
0,155	558	5,4742	2,192	0,0342	0,0140
0,160	576	5,6508	2,263	0,0362	0,0148
0,165	594	5,8274	2,334	0,0383	0,0157
0,170	612	6,0040	2,405	0,0404	0,0165
0,175	630	6,1806	2,475	0,0426	0,0175
0,180	648	6,3572	2,546	0,0448	0,0183
0,185	666	6,5338	2,617	0,0471	0,0193
0,190	684	6,7104	2,688	0,0495	0,0203
0,195	702	6,8870	2,758	0,0519	0,0212
0,200	720	7,0636	2,828	0,0543	0,0222
0,210	756	7,4167	2,970	0,0595	0,0244
0,220	792	7,7699	3,112	0,0648	0,0265
0,230	828	8,1231	3,254	0,0704	0,0288
0,240	864	8,4763	3,394	0,0761	0,0312
0,250	900	8,8294	3,536	0,0819	0,0335
0,260	936	9,1826	3,678	0,0885	0,0363
0,270	972	9,5358	3,820	0,0949	0,0389
0,280	1008	9,8890	3,960	0,1016	0,0416
0,290	1044	10,2422	4,102	0,1084	0,0444
0,300	1080	10,5953	4,244	0,1157	0,0674
0,400	1440	14,1272	5,656	0,1998	0,0819
0,450	1620	15,8931	6,360	0,2501	0,1025
0,500	1800	17,6589	7,072	0,3069	0,1258
0,550	1980	19,4248	7,780	0.3691	0,1513
0,600	2160	21,1907	8,488	0,4370	0,1791

$D = 0^{m},325$, $S = 0^{mq},082957$, $a = 0,000151$, $b = 0,000326$.

Volumes écoulés par 1″.	Volumes écoulés par heure.	Volumes en pieds cubes anglais par 1″.	Vitesses moyennes par 1″.	Pertes de charge pour 1000 mèt. en hauteur d'eau. Air.	Pertes de charge pour 1000 mèt. en hauteur d'eau. Gaz.
m. cub.	m. cub.	p. cub.	mèt.	mèt.	mèt.
0,010	36	0,3532	0,120	0,0003	0,0001
0,020	72	0,7063	0,241	0,0009	0,0003
0,030	108	1,0595	0,361	0,0015	0,0006
0,040	144	1,4127	0,482	0,0024	0,0010
0,050	180	1,7659	0,602	0,0033	0,0013
0,060	216	2,1190	0,723	0,0045	0,0018
0,070	252	2,4722	0,844	0,0057	0,0023
0,080	288	2,8254	0,964	0,0072	0,0029
0,090	324	3,1786	1,085	0,0087	0,0036
0,100	360	3,5318	1,205	0,0104	0,0042
0,110	396	3,8849	1,326	0,0122	0,0050
0,120	432	4,2381	1,446	0,0143	0,0058
0,130	468	4,5913	1,567	0,0165	0,0067
0,140	504	4,9445	1,687	0,0189	0,0077
0,150	540	5,2977	1,808	0,0213	0,0087
0,160	576	5,6508	1,928	0,0240	0,0098
0,170	612	6,0040	2,049	0,0267	0,0109
0,180	648	6,3572	2,169	0,0297	0,0122
0,190	684	6,7104	2,290	0,0327	0,0134
0,200	720	7,0635	2,411	0,0360	0,0148
0,210	756	7,4167	2,531	0,0393	0,0161
0,220	792	7,7699	2,652	0,0429	0,0174
0,230	828	8,1231	2,772	0,0466	0,0190
0,240	864	8,4763	2,893	0,0502	0,0206
0,250	900	8,8294	3,013	0,0544	0,0223
0,260	936	9,1826	3,134	0,0586	0,0240
0,270	972	9,5368	3,254	0,0628	0,0257
0,280	1008	9,8890	3,374	0,0673	0,0276
0,290	1044	10,2422	3,496	0,0719	0,0295
0,300	1080	10,5953	3,616	0,0767	0,0314
0,310	1116	10,9485	3,737	0,0815	0,0334
0,320	1152	11,3017	3,856	0,0866	0,0355
0,330	1188	11,6549	3,978	0,0918	0,0376
0,340	1224	12,0080	4,098	0,0972	0,0398
0,350	1260	12,3612	4,219	0,1026	0,0420
0,360	1296	12,7144	4,338	0,1083	0,0444
0,370	1332	13,0676	4,460	0,1141	0,0468
0,380	1368	13,4208	4,580	0,1201	0,0492
0,390	1404	13,7739	4,700	0,1261	0,0517
0,400	1440	14,1272	4,821	0,1324	0,0543
0,410	1476	14,4802	4,942	0,1388	0,0569
0,420	1512	14,8335	5,063	0,1443	0,0591
0,430	1548	15,1867	5,183	0,1499	0,0614
0,440	1584	15,5398	5,304	0,1579	0,0647
0,450	1620	15,8930	5,424	0,1659	0,0680
0,460	1656	16,2462	5,545	0,1731	0,0709
0,470	1692	16,5994	5,665	0,1804	0,0737
0,480	1728	16,9525	5,786	0,1879	0,0770
0,490	1764	17,3057	5,906	0,1955	0,0801
0,500	1800	17,6589	6,027	0,2033	0,0833
0,550	1980	19,4248	6,630	0,2444	0,1002
0,600	2160	21,1907	7,232	0,2892	0,1185
0,650	2340	22,9566	7,835	0,3380	0,1385
0,700	2520	24,7225	8,438	0,3904	0,1600

$D = 0^{m},350$, $S = 0^{mq},096211$, $a = 0,000125$, $b = 0,000310$.

Volumes écoulés par 1″.	Volumes écoulés par heure.	Volumes en pieds cubes anglais par 1″.	Vitesses moyennes par 1″.	Pertes de charge pour 1000 mèt. en hauteur d'eau. Air.	Pertes de charge pour 1000 mèt. en hauteur d'eau. Gaz.
m. cub.	m. cub.	p. cub.	mèt.	mèt.	mèt.
0,010	36	0,3532	0,104	0,0002	0,0001
0,020	72	0,7063	0,208	0,0005	0,0002
0,030	108	1,0595	0,312	0,0009	0,0004
0,040	144	1,4127	0,416	0,0015	0,0006
0,050	180	1,7659	0,520	0,0022	0,0009
0,060	216	2,1190	0,623	0,0029	0,0012
0,070	252	2,4722	0,727	0,0037	0,0015
0,080	288	2,8254	0,831	0,0046	0,0019
0,090	324	3,1786	0,935	0,0056	0,0023
0,100	360	3,5318	1,039	0,0068	0,0028
0,110	396	3,8849	1,143	0,0081	0,0033
0,120	432	4,2381	1,247	0,0094	0,0038
0,130	468	4,5913	1,351	0,0108	0,0044
0,140	504	4,9445	1,455	0,0123	0,0051
0,150	540	5,2976	1,559	0,0140	0,0057
0,160	576	5,6508	1,663	0,0157	0,0064
0,170	612	6,0040	1,767	0,0175	0,0072
0,180	648	6,3572	1,871	0,0194	0,0080
0,190	684	6,7104	1,975	0,0214	0,0088
0,200	720	7,0635	2,078	0,0235	0,0096
0,210	756	7,4167	2,182	0,0257	0,0105
0,220	792	7,7699	2,286	0,0281	0,0115
0,230	828	8,1231	2,390	0,0305	0,0125
0,240	864	8,4763	2,494	0,0330	0,0135
0,250	900	8,8294	2,598	0,0357	0,0147
0,260	936	9,1826	2,702	0,0384	0,0158
0,270	972	9,5358	2,806	0,0413	0,0169
0,280	1008	9,8890	2,910	0,0442	0,0180
0,290	1044	10,2422	3,014	0,0472	0,0192
0,300	1080	10,5953	3,118	0,0503	0,0207
0,320	1152	11,3017	3,325	0,0568	0,0233
0,340	1224	12,0080	3,533	0,0637	0,0261
0,360	1296	12,7144	3,742	0,0711	0,0291
0,380	1368	13,4208	3,950	0,0788	0,0323
0,400	1440	14,1272	4,156	0,0869	0,0356
0,420	1512	14,8335	4,364	0,0954	0,0391
0,440	1584	15,5398	4,572	0,1043	0,0427
0,460	1656	16,2462	4,780	0,1137	0,0466
0,480	1728	16,9527	4,988	0,1227	0,0503
0,500	1800	17,6589	5,197	0,1335	0,0547
0,520	1872	18,3653	5,404	0,1435	0,0588
0,540	1944	19,0716	5,612	0,1549	0,0635
0,560	2016	19,7780	5,820	0,1656	0,0679
0,580	2088	20,4843	6,028	0,1779	0,0729
0,600	2160	21,1907	6,236	0,1894	0,0776
0,620	2232	21,8970	6,444	0,2025	0,0830
0,640	2304	22,6034	6,650	0,2153	0,0882
0,660	2376	23,3098	6,860	0,2287	0,0938
0,680	2448	24,0161	7,066	0,2423	0,0994
0,700	2520	24,7225	7,275	0,2565	0,1051
0,800	2880	28,2542	8,312	0,3327	0,1364
0,900	3240	31,7860	9,350	0,4189	0,1717
1,000	3600	35,3178	10,394	0,5152	0,2112
1,100	3960	38,8495	11,430	0,6214	0,2547

D=0m,400, S=0mq,125664, a=0,000075, b=0,000280.					
VOLUMES écoulés		VOLUMES en pieds cubes anglais par 1″.	Vitesses moyennes par 1″.	PERTES DE CHARGE pour 1000 mèt. en hauteur d'eau.	
par 1″.	par heure.			Air.	Gaz.
m. cub.	m.cub.	p. cub.	mèt.	mèt.	mèt.
0,020	72	0,7063	0,159	0,0002	0,0001
0,040	144	1,4127	0,318	0,0007	0,0003
0,060	216	2,1190	0,477	0,0013	0,0005
0,080	288	2,8254	0,636	0,0020	0,0008
0,100	360	3,5318	0,795	0,0030	0,0012
0,120	432	4,2381	0,955	0,0042	0,0017
0,140	504	4,9445	1,114	0,0055	0,0022
0,160	576	5,6508	1,273	0,0069	0,0028
0,180	648	6,3572	1,432	0,0086	0,0035
0,200	720	7,0635	1,591	0,0104	0,0042
0,220	792	7,7699	1,750	0,0124	0,0051
0,240	864	8,4763	1,909	0,0148	0,0060
0,260	936	9,1826	2,069	0,0171	0,0070
0,280	1008	9,8890	2,228	0,0198	0,0081
0,300	1080	10,5953	2,387	0,0227	0,0093
0,320	1152	11,3017	2,546	0,0257	0,0105
0,340	1224	12,0080	2,705	0,0289	0,0119
0,360	1296	12,7144	2,864	0,0322	0,0132
0,380	1368	13,4208	3,024	0,0356	0,0146
0,400	1440	14,1272	3,183	0,0391	0,0160
0,420	1512	14,8335	3,342	0,0427	0,0175
0,440	1584	15,5398	3,501	0,0475	0,0195
0,460	1656	16,2462	3,660	0,0512	0,0210
0,480	1728	16,9527	3,819	0,0562	0,0230
0,500	1800	17,6589	3,979	0,0608	0,0249
0,520	1872	18,3653	4,138	0,0656	0,0269
0,540	1944	19,0716	4,297	0,0705	0,0289
0,560	2016	19,7780	4,456	0,0756	0,0310
0,580	2088	20,4843	4,615	0,0808	0,0331
0,600	2160	21,1907	4,774	0,0866	0,0355
0,620	2232	21,8970	4,934	0,0924	0,0379
0,640	2304	22,6034	5,093	0,0984	0,0403
0,660	2376	23,3098	5,252	0,1045	0,0428
0,680	2448	24,0161	5,411	0,1106	0,0453
0,700	2520	24,7225	5,570	0,1169	0,0479
0,720	2592	25,4288	5,729	0,1237	0,0507
0,740	2664	26,1352	5,888	0,1304	0,0534
0,760	2736	26,8415	6,048	0,1375	0,0563
0,780	2808	27,5479	6,207	0,1447	0,0593
0,800	2880	28,2543	6,366	0,1520	0,0623
0,820	2952	28,9606	6,525	0,1594	0,0653
0,840	3024	29,6670	6,684	0,1673	0,0686
0,860	3096	30,3733	6,843	0,1753	0,0718
0,880	3168	31,0797	7,003	0,1833	0,0751
0,900	3240	31,7860	7,162	0,1915	0,0785
0,920	3312	32,4924	7,321	0,2000	0,0820
0,940	3384	33,1988	7,480	0,2086	0,0855
0,960	3456	33,9051	7,639	0,2174	0,0891
0,980	3528	34,6115	7,798	0,2264	0,0928
1,000	3600	35,3178	7,957	0,2356	0,0960
1,100	3960	38,8495	8,750	0,2841	0,1164
1,200	4320	42,3814	9,548	0,3374	0,1383
1,300	4680	45,9132	10,346	0,3953	0,1620
1,400	5040	49,4450	11,140	0,4575	0,1875

D=0m,500, S=0mq,196350, a=0,000020, b=0,000246.					
VOLUMES écoulés		VOLUMES en pieds cubes anglais par 1″.	Vitesses moyennes par 1″.	PERTES DE CHARGE pour 1000 mèt. en hauteur d'eau.	
par 1″.	par heure.			Air.	Gaz.
m.cub.	m.cub.	p. cub.	mèt.	mèt.	mèt.
0,025	90	0,8829	0,127	0,00006	0,00002
0,050	180	1,7659	0,254	0,0002	0,00008
0,075	270	2,6488	0,382	0,0004	0,00018
0,100	360	3,5318	0,509	0,0007	0,0003
0,125	450	4,4147	0,633	0,0011	0,0004
0,150	540	5,2977	0,764	0,0016	0,0006
0,175	630	6,1806	0,891	0,0022	0,0009
0,200	720	7,0635	1,018	0,0028	0,0011
0,225	810	7,9465	1,146	0,0035	0,0014
0,250	900	8,8294	1,273	0,0043	0,0018
0,275	990	9,7124	1,400	0,0052	0,0021
0,300	1080	10,5953	1,528	0,0062	0,0025
0,325	1180	11,4783	1,655	0,0073	0,0030
0,350	1260	12,3612	1,782	0,0084	0,0034
0,375	1350	13,2442	1,909	0,0096	0,0039
0,400	1440	14,1272	2,037	0,0109	0,0045
0,425	1530	15,0101	2,164	0,0123	0,0050
0,450	1620	15,8930	2,292	0,0138	0,0056
0,475	1710	16,7760	2,419	0,0153	0,0063
0,500	1800	17,6589	2,546	0,0169	0,0069
0,525	1890	18,5418	2,673	0,0187	0,0076
0,550	1980	19,4248	2,801	0,0205	0,0084
0,575	2070	20,3077	2,928	0,0223	0,0091
0,600	2160	21,1907	3,055	0,0243	0,0099
0,625	2250	22,0736	3,183	0,0263	0,0108
0,650	2340	22,9566	3,310	0,0285	0,0117
0,675	2430	23,8395	3,437	0,0307	0,0126
0,700	2520	24,7225	3,565	0,0330	0,0135
0,725	2610	25,6054	3,692	0,0353	0,0145
0,750	2700	26,4884	3,819	0,0378	0,0155
0,775	2790	27,3713	3,947	0.0403	0,0165
0,800	2880	28,2543	4,074	0,0429	0,0176
0,825	2970	29,1372	4,201	0,0456	0,0187
0,850	3060	30,0202	4,329	0,0484	0,0198
0,875	3150	30,9031	4,456	0,0513	0,0210
0,900	3240	31,7860	4,583	0,0542	0,0222
0,925	3340	32,6690	4,710	0,0573	0,0235
0,950	3420	33,5519	4,838	0,0604	0,0247
0,975	3510	34,4349	4,965	0,0636	0,0261
1,000	3600	35,3178	5,093	0,0669	0,0274
1,025	3690	36,3008	5,220	0,0702	0,0288
1,050	3780	37,0837	5,347	0,0737	0,0302
1,075	3870	37,9667	5,474	0.0772	0,0316
1,100	3960	38,8495	5,602	0,0808	0,0331
1,125	4050	39,6325	5,729	0,0845	0,0346
1,150	4140	40,6155	5,857	0,0876	0,0359
1,175	4230	41,2984	5,984	0,0881	0,0361
1,200	4320	42,3814	6,111	0,0960	0,0393
1,225	4410	42,9643	6,289	0,1015	0,0416
1,250	4500	44,1473	6,364	0,1041	0,0427
1,300	4680	45,9132	6,620	0,1140	0,0468
1,400	5040	49,4450	7,130	0,1320	0,0540
1,500	5400	52,9768	7,638	0,1512	0,0620
1,600	5760	56,5086	8,148	0,1716	0,0704

D = 0m,600, S = 0mq,282744, a = 0, b = 0,000220.

VOLUMES écoulés par 1″.	VOLUMES écoulés par heure	VOLUMES en pieds cubes anglais par 1″.	Vitesses moyennes par 1″.	PERTES DE CHARGE pour 1000 mèt. en hauteur d'eau. Air.	PERTES DE CHARGE pour 1000 mèt. en hauteur d'eau. Gaz.
m. cub.	m. cub.	p. cub.	mèt.	mèt.	mèt.
0,025	90	0,8829	0,088	0,00001	0,000006
0,050	180	1,7659	0,177	0,00006	0,000024
0,075	270	2,6488	0,265	0,00013	0,000054
0,100	360	3,5318	0,353	0,0002	0,000096
0,125	450	4,4147	0,442	0,0003	0,00015
0,150	540	5,2976	0,530	0,0005	0,00022
0,175	630	6,1806	0,618	0,0007	0,00029
0,200	720	7,0635	0,707	0,0009	0,00038
0,225	810	7,9465	0,795	0,0012	0,00049
0,250	900	8,8294	0,884	0,0014	0,0006
0,275	990	9,7124	0,972	0,0018	0,0007
0,300	1080	10,5953	1,061	0,0021	0,0009
0,325	1170	11,4783	1,149	0,0025	0,0010
0,350	1260	12,3612	1,237	0,0029	0,0012
0,375	1350	13,2442	1,326	0,0033	0,0013
0,400	1440	14,1271	1,414	0,0038	0,0015
0,425	1530	15,0101	1,502	0,0042	0,0017
0,450	1620	15,8930	1,591	0,0048	0,0019
0,475	1710	16,7760	1,679	0,0053	0,0022
0,500	1800	17,6589	1,768	0,0059	0,0024
0,525	1890	18,5419	1,856	0,0065	0,0026
0,550	1980	19,4248	1,945	0,0071	0,0029
0,575	2070	20,3072	2,033	0,0078	0,0032
0,600	2160	21,1907	2,121	0,0085	0,0035
0,625	2250	22,0736	2,209	0,0092	0,0038
0,650	2340	22,9566	2,298	0,0100	0,0041
0,675	2430	23,8395	2,386	0,0107	0,0044
0,700	2520	24,7225	2,475	0,0115	0,0047
0,725	2610	25,6054	2,563	0,0124	0,0051
0,750	2700	26,4884	2,652	0,0133	0,0054
0,775	2790	27,3713	2,740	0,0142	0,0058
0,800	2880	28,2543	2,829	0,0151	0,0061
0,825	2970	29,1372	2,917	0,0160	0,0066
0,850	3060	30,0201	3,005	0,0170	0,0070
0,875	3150	30,9031	3,094	0,0181	0,0074
0,900	3240	31,7860	3,182	0,0191	0,0078
0,925	3330	32,6690	3,270	0,0202	0,0083
0,950	3420	33,5519	3,359	0,0213	0,0087
0,975	3510	34,4349	3,447	0,0224	0,0092
1,000	3600	35,3178	3,536	0,0235	0,0096
1,050	3780	37,0837	3,712	0,0260	0,0106
1,100	3960	38,8495	3,889	0,0284	0,0116
1,150	4140	40,6155	4,066	0,0312	0,0128
1,200	4320	42,3814	4,243	0,0340	0,0139
1,250	4500	44,1473	4,420	0,0369	0,0151
1,300	4680	45,9132	4,596	0,0399	0,0163
1,350	4860	47,6791	4,773	0,0430	0,0176
1,400	5040	49,4450	4,950	0,0462	0,0189
1,450	5220	51,2109	5,126	0,0496	0,0203
1,500	5400	52,9768	5,303	0,0531	0,0218
1,600	5760	56,5086	5,658	0,0604	0,0244
1,700	6120	60,0402	6,010	0,0680	0,0280
1,800	6480	63,5720	6,364	0,0764	0,0312
1,900	6840	67,1038	6,718	0,0852	0,0348

D = 0m,700, S = 0mq,384846, a = 0, b = 0,000200.

VOLUMES écoulés par 1″.	VOLUMES écoulés par heure.	VOLUMES en pieds cubes anglais par 1″.	Vitesses moyennes par 1″.	PERTES DE CHARGE pour 1000 mèt. en hauteur d'eau. Air.	PERTES DE CHARGE pour 1000 mèt. en hauteur d'eau. Gaz.
m. cub.	m. cub.	p. cub.	mèt.	mèt.	mèt.
0,050	180	1,7659	0,130	0,00002	0,00001
0,100	360	3,5318	0,260	0,00009	0,00004
0,150	540	5,2977	0,390	0,00022	0,00009
0,200	720	7,0635	0,519	0,00039	0,00016
0,250	900	8,8294	0,649	0,0006	0,00025
0,300	1080	10,5953	0,779	0,0009	0,00036
0,350	1260	12,3612	0,909	0,0012	0,0005
0,400	1440	14,1271	1,038	0,0016	0,0006
0,450	1620	15,8930	1,169	0,0020	0,0008
0,500	1800	17,6589	1,299	0,0023	0,0010
0,550	1980	19,4248	1,429	0,0030	0,0012
0,600	2160	21,1907	1,558	0,0035	0,0014
0,650	2340	22,9566	1,689	0,0042	0,0017
0,700	2520	24,7225	1,819	0,0048	0,0020
0,750	2700	26,4884	1,949	0,0056	0,0023
0,800	2880	28,2543	2,076	0,0063	0,0026
0,850	3060	30,0202	2,208	0,0071	0,0029
0,900	3240	31,7860	2,348	0,0081	0,0033
0,950	3420	33,5519	2,468	0,0089	0,0037
1,000	3600	35,3178	2,598	0,0099	0,0040
1,050	3780	37,0837	2,728	0,0109	0,0045
1,100	3960	38,8495	2,858	0,0120	0,0049
1,150	4140	40,6155	2,988	0,0131	0,0054
1,200	4320	42,3814	3,116	0,0143	0,0058
1,250	4500	44,1473	3,248	0,0155	0,0063
1,300	4680	45,9132	3,378	0,0168	0,0069
1,350	4860	47,6791	3,508	0,0181	0,0074
1,400	5040	49,4450	3,638	0,0194	0,0080
1,450	5220	51,2109	3,767	0,0207	0,0085
1,500	5400	52,9767	3,897	0,0223	0,0091
1,550	5580	54,7427	4,027	0,0238	0,0097
1,600	5760	56,5085	4,152	0,0253	0,0104
1,650	5940	58,2745	4,287	0,0270	0,0111
1,700	6120	60,0403	4,416	0,0287	0,0117
1,750	6300	61,8062	4,547	0,0304	0,0124
1,800	6480	63,5721	4,696	0,0324	0,0133
1,850	6660	65,3380	4,807	0,0339	0,0139
1,900	6840	67,1039	4,956	0,0358	0,0147
1,950	7020	68,8698	5,067	0,0377	0,0154
2,000	7200	70,6357	5,196	0,0397	0,0163
2,050	7380	72,4016	5,327	0,0417	0,0171
2,100	7560	74,1675	5,456	0,0437	0,0179
2,150	7740	75,9334	5,586	0,0458	0,0188
2,200	7920	77,6991	5,716	0,0480	0,0197
2,250	8100	80,4652	5,846	0,0502	0,0206
2,300	8280	81,2311	5,976	0,0525	0,0215
2,350	8460	83,9969	6,106	0,0548	0,0224
2,400	8640	84,7628	6,232	0,0571	0,0234
2,450	8820	87,5287	6,366	0,0596	0,0244
2,500	9000	88,2946	6,496	0,0620	0,0254
2,700	9720	95,3582	7,016	0,0724	0,0296
2,900	10440	102,4218	7,534	0,0828	0,0340
3,100	11160	109,4854	8,054	0,0952	0,0388
3,500	12600	123,6124	9,094	0,1216	0,0496

693. Tuyaux pour conduites de gaz. Les tuyaux employés pour les conduites de gaz sont en fonte ou en tôle bitumée, comme pour l'eau (202 et suivants), et en plomb pour les diamètres de 10 à 108 millimètres (225).

Tuyaux employés par la Compagnie parisienne, pendant l'année 1891:

En tôle et bitume à joints précis Chameroy (P. de Singly et Cie), pour les diamètres	0^m,41 à 1^m,30
En fonte Fortin-Hermann, pour les diamètres	0 ,08 à 0 ,15
En fonte (emboîtement et cordon) (façon de Paris), (Chappe, Leblanc-Georgi, Capitain Geny), pour les diamètres	0 ,054 à 1 ,00

On n'a pas suivi cette règle avec exactitude, à cause du manque de tuyaux à certaines époques, et la Compagnie emploie surtout les tuyaux en tôle et bitume à joints précis, qui présentent le moins de chances de fuites en même temps qu'ils sont les plus économiques ; on en a fait depuis 0^m,035 jusqu'à 1^m,30 de diamètre. Ainsi, pendant qu'à Paris on abandonnait les tuyaux en tôle et bitume pour les conduites d'eau, l'usage de ces tuyaux s'y généralisait pour les conduites de gaz.

694. Les tuyaux en tôle et bitume (229) ont 4 mètres de longueur, et ils sont formés de 3 bouts pour les diamètres de 0^m,35 et au-dessus.

Quand on a donné aux feuilles de tôle une longueur convenable, on les décape en les plongeant successivement dans plusieurs bains d'eau acidulée; puis on les rend inoxydables par un étamage contenant surtout du plomb et un peu d'étain. On cintre alors les feuilles en les passant dans un laminoir à 3 cylindres; puis on perce les trous pour la rivure longitudinale, en ayant soin que le recouvrement soit de 0^m,02 à 0^m,03, selon les diamètres. Les tôles sont livrées plombées à MM. de Singly et Ce.

Les rivets doivent être étamés et avoir de 4 à 11 millimètres, suivant le diamètre du tuyau. Lorsque la rivure longitudinale est faite, on achève de donner au tuyau une forme circulaire exacte au moyen de maillets. Pour les gros diamètres qui se composent de 3 bouts, on ajuste les diverses parties, et on les force à entrer l'un dans l'autre au moyen d'une presse à vis horizontale, agissant sur le tuyau par l'intermédiaire d'un tampon. Les rivets servant à réunir les bouts d'un même tuyau sont écartés d'environ 0^m,08. Toutes les croisures et les rivures doivent être soudées avec grand soin au moyen d'un alliage à base de plomb très liquide, afin de bien boucher tous les interstices.

Aux deux extrémités du tuyau on coule, au moyen de moules, des petits manchons de plomb, à l'intérieur du tuyau pour le bout femelle et à l'extérieur pour le bout mâle. Le moule est disposé de manière que la saillie de plomb limite la partie bitumée. Ce petit manchon de plomb a de 0^m,042 à 0^m,120 de longueur. Sur la partie mâle on pratique, au tour, deux rainures pour les gros diamètres et une pour les petits; dans cette rainure, lors de la pose, on place une corde de chanvre qui rend le joint tout à fait étanche. Les tuyaux ainsi préparés sont essayés à la presse hydraulique à une pression de 5 atmosphères. Si les soudures sont bien faites, il n'y a aucune fuite. Les tuyaux sont alors goudronnés à l'extérieur et à l'intérieur, avec un goudron léger mélangé d'huile lourde ou d'es-

sence de térébenthine, puis enveloppés d'un treillis de fil de trame. Deux hommes, saisissant alors un tuyau par un mandrin qui le traverse et en protège les parties devant s'assembler avec précision, le font tourner dans un bassin contenant du bitume liquide. Ce bitume est fondu dans des espèces de chaudières avec de la marne en poudre, et le mélange est brassé par un agitateur placé dans l'axe de la chaudière et tournant d'une manière uniforme.

Quand le tuyau est enduit d'une certaine couche de ce bitume, on le roule sur une table couverte de gravier jusqu'à ce qu'il ait obtenu un diamètre convenable, en ajoutant au besoin du bitume où l'épaisseur n'est pas suffisante. Si le tuyau sert pour l'eau, il reçoit intérieurement une couche de bitume fin, qui prend le brillant et le poli d'un beau vernis. Pour le gaz il n'en est pas ainsi.

Ces tuyaux ont l'avantage d'être très légers; on les pose très facilement, surtout quand ils sont à joints précis. Pour cela, après avoir nettoyé préalablement les joints avec une brosse dure, ou avec un grattoir si cela est nécessaire, on remplit les rainures circulaires de fil fin de trame imprégné de suif pur fondu; on enduit ensuite les deux parties formant joint avec un mélange composé de plombagine et de saindoux en proportions égales; enfin on forme le joint en emmanchant la partie du tuyau portant garniture dans l'autre qui porte manchon. On force les deux tuyaux à rentrer l'un dans l'autre jusqu'à ce que les collets se touchent, à l'aide d'un marteau dont on frappe à petits coups sur un tampon en bois appliqué contre l'extrémité libre du tuyau que l'on pose. Pour des diamètres supérieurs à $0^{m},300$, on remplace le marteau par des béliers de poids convenables. Il faut bien présenter les tuyaux en ligne droite, afin de ne pas forcer les joints.

Dans les *anciens tuyaux en tôle et bitume* le manchon en plomb portant deux rainures pour recevoir la garniture était remplacé par un manchon en alliage à base de plomb, fileté à l'intérieur pour une des extrémités du tuyau et à l'extérieur pour l'autre. C'est en vissant ces manchons les uns dans les autres qu'on posait les tuyaux; mais ce travail était moins facile qu'avec les tuyaux à joints précis.

695. Les tuyaux en fonte Fortin-Herrmann sont entièrement cylindriques, sans rainures ni bourrelet; de sorte que les bouts sont aussi faciles à poser que les tuyaux entiers. Pour les assembler, on passe d'abord un manchon en plomb sur les deux extrémités à réunir, et à l'aide de deux bagues en fonte on comprime le plomb sur les tuyaux. Comme les deux bagues en fonte sont légèrement coniques à l'intérieur, c'est en les rapprochant jusqu'à ce qu'elles arrivent presque en contact qu'on obtient cette progression du plomb, qu'on matte encore au marteau. Ces tuyaux demandent à être fabriqués avec beaucoup de soin et à être coulés debout. Un inconvénient de leur pose est la nécessité de faire une excavation dans le sol à chaque point.

L'épaisseur des tuyaux en fonte peut être donnée par la formule :

$$e = \frac{D}{80} + 8.$$

Les *tuyaux en fonte à emboîtement et cordon* sont les mêmes que pour l'eau, et se posent de la même manière (202 et suivants). On les a employés presque exclusivement pendant longtemps; mais aujourd'hui on donne la préférence aux tuyaux en tôle et bitume qui sont moins lourds, d'un prix de pose moins élevé et plus faciles à réparer.

Les tuyaux en fonte à emboîtement et cordon (façon Paris) sont cylindriques; l'étendue du joint femelle porte une rainure destinée à retenir le plomb coulé. L'extrémité du tuyau portant cordon est munie d'un épaulement extérieur limitant la longueur de l'emboîtement. On l'emmanche sur un tuyau jusqu'au fond de la tubulure. Puis l'on introduit de la corde goudronnée que l'on refoule jusqu'au cordon, puis dans l'espace antérieur qui reste libre on coule du plomb que l'on matte de manière à fermer hermétiquement le joint.

Les *tuyaux en fonte à joints articulés* de MM. Doré et Chevé s'emploient aussi pour les conduites de gaz (221).

Dans quelques villes on a employé les *tuyaux en terre cuite;* ils sont peu coûteux, mais difficiles à poser (228).

Système de joint mobile pour tuyaux de gaz posés sur les ponts suspendus. M. Bouvier, ingénieur des ponts et chaussées, donne, dans le numéro de juillet 1875 des *Annales* de son corps, les dispositions d'un tel joint, à deux rondelles en caoutchouc, appliqué au pont suspendu établi sur le Rhône pour relier Tournon et Tain. Les tuyaux sont en tôle bitumée de Chameroy. Ce système de joint peut aussi, dans des cas analogues, être employé pour les conduites d'eau, pourvu qu'on prenne des précautions pour empêcher les effets de la congélation. Un système particulier de joints a été adopté par la Compagnie du gaz pour les ponts de l'île Saint-Denis.

696. Tuyaux en plomb, en cuivre, en fer, etc. Le *plomb* s'emploie pour les conduites de faible diamètre, branchements et distributions intérieures, à cause de sa malléabilité, de la facilité de la pose, des raccords, soudures, etc.

En Belgique et en Angleterre, on emploie beaucoup plus le *fer* pour le même usage, mais en France le fer est laissé aux ateliers et grands établissements, pour les conduites de longue portée. On emploie aussi quelquefois des tubes de *cuivre* (781) pour les petites distributions, parce qu'il offre plus de résistance que le plomb avec moindre épaisseur, et trouve son emploi partout où il est nécessaire de masquer les conduites, sur les bords d'une glace, dans des moulures, sur des plafonds, etc. Le cuivre exige des soudures fortes et sa pose est beaucoup plus dispendieuse et difficultueuse que celle du plomb. En Angleterre, on fait usage, pour les petites distributions, de *campo-pipe,* alliage qui a l'aspect de l'étain.

Le campo-pipe est bien moins malléable que le plomb et exige une soudure plus fine, c'est-à-dire comportant plus d'étain que la soudure ordinaire des plombiers.

Le plomb a l'avantage de ne pas être attaqué par les dépôts de condensation du gaz.

Le *cuivre* donne naissance à des dépôts, et lorsque le gaz renferme de

l'acétylène, il donne de l'acétyline de cuivre, corps qui fait explosion si on le chauffe pour resouder le tuyau devenu hors d'usage. Dans les canalisations de gros diamètres, le plomb n'est employé que pour la confection de certains joints.

Le plomb coûte environ 50 francs les 100 kilog.

Nous donnons ci-après les *poids des tuyaux en plomb* des divers diamètres employés soit pour les conduites de gaz, soit pour les conduites d'eau (216) :

DIAMÈTRE intérieur en millimètres.	ÉPAISSEURS EN MILLIMÈTRES.								
	2^{mm}	3^{mm}	4^{mm}	5^{mm}	6^{mm}	7^{mm}	8^{mm}	9^{mm}	10^{mm}
	Poids en kilog. de 1 mètre de longueur de tuyau en plomb.								
10	0,86	1,39	2,00	2,68	3,43	4,25	5,14	6,10	7,13
13	1,07	1,71	2,43	3,21	4,07	5,00	6,00	7,06	8,20
15	1,21	1,93	2,71	3,57	4,50	5,50	6,57	7,71	8,91
20	1,57	2,46	3,43	4,46	5,57	6,74	8,00	9,31	10,70
25	1,93	3,00	4,14	5,35	6,63	7,98	9,42	10,91	12,48
30	2,28	3,53	4,85	6,24	7,70	9,24	10,85	12,52	14,26
40	3,00	4,60	6,28	8,03	9,84	11,73	13,70	15,73	17,83
50	3,71	5,67	7,71	9,81	11,98	14,23	16,55	18,94	21,39
60	4,42	6,74	9,13	11,59	14,12	16,73	19,41	22,15	24,96
70	5,14	7,81	10,56	13,37	16,26	19,22	22,26	25,26	28,52

Les *tuyaux en fer dits étirés* (Gandillot, J. Daulton), pour les conduites d'eau, de gaz et de vapeur, se font entre $0^m,05$ et $0^m,80$ de diamètre intérieur D. Leur épaisseur est donnée par la formule :

$$e = \frac{D}{13} + 2.$$

Le démontage des conduites de ce genre est très laborieux.

La fabrication s'applique surtout aux petits diamètres. Ces tuyaux sont plus chers que les tuyaux en fonte. Chaque tuyau présente ses deux extrémités filetées ; le joint des deux tuyaux se fait par des manchons formant écrous. Les bifurcations se font avec des pièces spéciales de raccord. Ces tubes se font jusqu'à 6 mètres de longueur.

MM. P. de Singly et Cᵉ fabriquent aussi des *tuyaux galvanisés* pour irrigations et submersion des vignes phylloxérées. Ces tuyaux ont 4 mètres de longueur et sont essayés à une pression de 15 atmosphères. Il s'en fait pour les diamètres (en millimètres) de :

50^{mm},	75^{mm},	100^{mm},	125^{mm},	150^{mm},	175^{mm},	200^{mm},	250^{mm},	300^{mm}
11^{kg},	17^{kg},	21^{kg},	28^{kg},	34^{kg},	43^{kg},	51^{kg},	70^{kg},	100^{kg}.

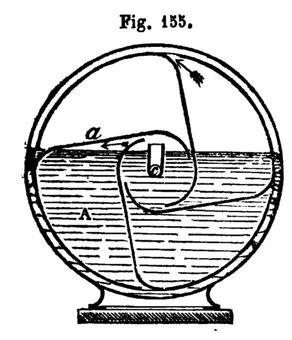
697. *Dimensions, poids et prix des principaux tuyaux employés par la Compagnie Parisienne du gaz.*

NATURE DES TUYAUX.	Diamètre	$0^m,054$	$0^m,081$	$0^m,108$	$0^m,162$	$0^m,216$	$0^m,244$	$0^m,271$	$0^m,297$	$0^m,325$	$0^m,350$	$0^m,40$	$0^m,50$	$0^m,70$
TUYAUX EN TÔLE ET BITUME, à joints précis (Chameroy).	Épaisseur de la tôle en millimèt.	0,9	1,0	1,10	1,3	1,5	1,6	1,7	1,9	2,1	2,3	2,5	2,9	4,0
Longueur des tuyaux : $3^m,90$ à 4^m.	Poids par mètre	$6^k,00$	$8^k,50$	$11^k,00$	$17^k,00$	$25^k,00$	$28^k,00$	$33^k,00$	$39^k,00$	$43^k,00$	$52^k,00$	$70^k,00$	$90^k,00$	$125^k,00$
Tolérance sur l'épaisseur de la tôle :	Prix du mètre (sans rabais)	2 65,	$3^f,75$	$5^f,25$	$8^f,85$	$12^f,45$	$14^f,75$	$17^f,00$	$19^f,30$	$23^f,25$	$27^f,80$	$31^f,75$	$44^f,20$	$77^f,05$
Grands diam. $0^{mm},2$; petits diam. $0^{mm},1$.	*Id.* (rabais de 13,50 p. 100)	2 ,30	3 ,25	4 ,55	7 ,65	10 ,77	12 ,75	14 ,70	16 ,70	20 ,10	24 ,05	27 ,50	38 ,25	66 ,70
Epaisseur du bitume.	Prix de pose sans terrassement	0 ,21	0 ,28	0 ,34	0 ,48	0 ,64	0 ,73	0 ,82	0 ,92	1 ,05	1 ,15	1 ,40	2 ,00	2 ,90
Tuyaux de $0^m,054$ à $0^m,162$, 5 à 10 mil. Tuyaux de $0^m,216$ à $0^m,70$, 7 à 14 mil.	Prix par mètre avec la pose	2 ,51	3 ,53	4 ,89	8 ,13	11 ,41	13 ,48	15 ,52	17 ,62	21 ,15	25 ,20	28 ,90	40 ,25	$69^f,60$

NATURE DES TUYAUX.	**Diamètre intérieur**	$0^m,084$	$0^m,106$	$0^m,157$	$0^m,207$	$0^m,258$	$0^m,308$	$0^m,360$	$0^m,510$	$0^m,710$
TUYAUX EN FONTE.	Épaisseur en millimètres	6,5	7	7	8	8	9	9	11	14
(Fortin-Herrmann).	Longueur	$2^m,00$	$2^m,00$	$2^m,25$	$2^m,25$	$2^m,25$	$2^m,50$	$2^m,50$	$3^m,00$	$3^m,00$
Tolérance sur les poids :	Poids par tuyau, densité 7,207	$26^k,636$	$35^k,319$	$58^k,474$	$87^k,630$	$108^k,402$	$161^k,491$	$187^k,995$	$389^k,287$	$688^k,483$
3 p. 100.	Poids par mètre courant	13 ,318	17 ,910	25 ,986	38 ,940	48 ,170	64 ,600	75 ,200	129 ,762	229 ,494
24 fr. les 100 kilog.	Poids des rondelles par mètre	1 ,076	1 ,580	2 ,348	3 ,592	5 ,418	7 ,232	8 ,988	12 ,939	22 ,981
	Poids par mètre avec rondelles	14 ,394	19 ,490	28 ,334	42 ,532	53 ,588	71 ,832	84 ,188	142 ,701	252 ,475
	Prix *id.* *id.*	$3^f,60$	$4^f,90$	$7^f,15$	$10^f,70$	$13^f,45$	$18^f,05$	$21^f,15$	$35^f,60$	$63^f,36$
	Prix du plomb du joint par mètre	0 ,60	0 ,93	1 ,23	1 ,96	2 ,54	3 ,02	4 ,02	5 ,62	11 ,60
	Prix de pose et brevet	0 ,90	1 ,05	1 ,80	2 ,40	2 ,75	3 ,15	3 ,45	4 ,55	7 ,20
	Prix par mètre avec pose	$5^f,10$	$6^f,88$	$10^f,18$	$15^f,06$	$18^f,74$	$24^f,22$	$28^f,60$	$45^f,77$	$82^f,16$
Idem. 25 fr. les 100 kilog.	Prix par mètre avec rondelles	$3^f,80$	$5^f,10$	$7^f,45$	$11^f,15$	$14^f,05$	$18^f,80$	$22^f,00$	$37^f,10$	$66^f,00$
	Prix par mètre compris la pose	5 ,30	7 ,08	10 ,48	15 ,51	19 ,34	24 ,97	29 ,45	47 ,27	84 ,80
TUYAUX EN FONTE.	Épaisseur en millimètres	5,5	6	6	7	7	8	8	10	14
(Fortin-Herrmann).	Longueur	$2^m,00$	$2^m,00$	$2^m,25$	$2^m,25$	$2^m,25$	$2^m,50$	$2^m,50$	$3^m,00$	$3^m,00$
Épaisseurs réduites.	Poids d'un tuyau	$23^k,14$	$30^k,10$	$51^k,62$	$80^k,80$	$100^k,00$	$151^k,25$	$178^k,45$	$402^k,00$	$649^k,00$
Dans le calcul des prix on augmente le poids normal de la tolérance :	Poids par mètre	11 ,57	15 ,09	22 ,65	35 ,61	41 ,64	60 ,51	70 ,38	135 ,16	216 ,00
3 p. 100.	Poids des rondelles par mètre	1 ,26	1 ,550	2 ,348	3 ,592	5 ,418	7 ,232	8 ,988	12 ,939	22 ,981
25 fr. les 100 kilog.	Poids par mètre avec rondelles	12 ,83	16 ,64	25 ,00	39 ,200	47 ,16	67 ,74	79 ,380	148 ,10	239 ,00
	Prix *id.* *id.*	$3^f,20$	$4^f,27$	$6^f,25$	$9^f,80$	$11^f,79$	$16^f,93$	$19^f,84$	$37^f,02$	$59^f,75$
	Prix du plomb du joint par mètre	0 ,60	0 ,93	1 ,23	1 ,96	2 ,54	3 ,02	4 ,02	5 ,62	11 ,60
	Prix de pose et de brevet	0 ,90	1 ,05	1 ,80	2 ,40	2 ,75	3 ,15	3 ,45	4 ,55	7 ,20
	Prix par mètre compris la pose	$4^f,70$	$6^f,25$	$0^f,28$	$14^f,16$	$17^f,08$	$23^f,10$	$27^f,31$	$47^f,19$	$78^f,55$

698. Compteur à gaz. La figure 155 est la coupe perpendiculaire à l'axe d'un compteur, qui n'est autre chose qu'une roue à augets formés d'une tôle galvanisée, placée dans un cylindre horizontal rempli d'eau jusqu'à un niveau convenable. Le tuyau qui amène le gaz vient déboucher dans l'axe de l'appareil en *c*. Le gaz en arrivant presse la palette *a* de l'auget A qu'il remplit, et fait tourner la roue. Sitôt qu'un auget est plein, mais seulement alors, il vient verser son gaz dans la partie supérieure du cylindre-enveloppe, où se trouve le tuyau qui le conduit aux becs d'éclairage. Comme tout le gaz est obligé de passer dans les augets, on conçoit, que connaissant la capacité des augets et le nombre de tours de la roue, on a la quantité de gaz consommé. Les aiguilles de trois cadrans fixés sur le devant du compteur, mises en mouvement par la roue elle-même, indiquent l'une les mètres cubes, l'autre les dizaines, et la troisième les centaines de mètres cubes débités.

Fig. 155.



Le compteur doit être monté parfaitement de niveau, dans un endroit frais, mais protégé contre la gelée, plus bas que les becs qu'il doit desservir. Tous les mois, on doit s'assurer que l'eau a conservé son niveau dans le compteur; s'il y a une petite différence, par des trous placés à des hauteurs convenables et fermés par des vis, on introduit ou l'on retire un peu d'eau. Pendant cette opération, on ferme le robinet de communication avec la canalisation de l'usine.

Dans le compteur Clegg, perfectionné par Crossley, la partie mobile affecte la forme d'une vis d'Archimède (339) à axe horizontal, et elle plonge un peu plus qu'à moitié dans l'eau. Le gaz arrive dans la vis par une extrémité et sort par l'autre. La longueur de la vis est telle que, quelle que soit sa position, les cloisons s'opposent à ce qu'il y ait communication entre les deux extrémités.

Le compteur ne doit pas faire plus de 100 tours par heure, et cependant la perte de pression qu'il fait subir au gaz atteint 2 millimètres.

699. Perte de gaz due aux compteurs (1). Les erreurs dans le mesurage du compteur proviennent de l'évaporation de l'eau, de la pose défectueuse ou encore de la surcharge.

Tableau des erreurs de mesurage provenant de l'abaissement de l'eau au bout d'un mois.

Capacité des compteurs.	Volume d'eau enlevé.	Abaissement du niveau.	Erreur dans le mesurage.
3 becs.	$0^{\text{lit}},3$ ou $0^{\text{kg}},300$ grammes.	6 millimètres.	5 p. 100.
5 —	0 ,5 0 ,500 —	9 —	4 —
10 —	1 ,0 1 ,000 —	10 —	4 —

(1) Les renseignements qui suivent nous ont été obligeamment fournis par M. Auguste Lévy, ingénieur de la Compagnie du gaz, auquel nous devons aussi plusieurs autres documents qui nous ont aidé dans notre travail sur l'éclairage au gaz.

Capacité des compteurs.		Volume d'eau enlevé.	Abaissement du niveau.	Erreur dans le mesurage.
20 —	1^{lit},8	1^{kg},800 grammes.	12 millimètres.	4 p. 100.
30 —	2 ,5	2 ,500 —	12 —	3 —
40 —	3 ,0	3 ,000 —	12 —	3 —
60 —	4 ,0	4 ,000 —	12 —	3 —
80 —	4 ,0	4 ,000 —	12 —	2,8 —
100 —	5 ,0	5 ,000 —	12 —	2,5 —
150 —	8 ,0	8 ,000 —	12 —	2 —

D'après les expériences faites pendant deux ans par M. Coze, directeur de la Compagnie du gaz de Reims, on aurait, pour 100 mètres cubes mesurés dans des compteurs d'un nombre de becs de :

3	5	10	20	30	40	60	80	100	150	200	300	400	500

des pertes correspondantes en litres de :

0^{lit},430	0,331	0,245	0,207	0,171	0,170	0,135	0,149	0,141	0,229	0,223	0,032	0,123	0,017

La perte de gaz résultant du mesurage inexact était de :

3,32 p. 100	pour les	compteurs	à 3 becs.	0,68 p. 100	pour les	compteurs	à 80 becs.
1,84	—	—	5 —	0,83	—	—	100 —
1,37	—	—	10 —	1,04	—	—	150 —
1,27	—	—	20 —	1,31	—	—	200 —
1,76	—	—	30 —	0,13	—	—	300 —
1,15	—	—	40 —	1,25	—	—	400 —
0,58	—	—	60 —	0,08	—	—	500 —

De sorte que sur 2052274 mètres cubes, mesurés par les compteurs de 20 à 30 becs, la Compagnie du gaz de Reims a perdu 39 333 mètres cubes de gaz, soit 2 p. 100. Pour les compteurs de 3 et de 5 becs, cette perte s'élève à 2,56 p. 100. Pour les compteurs de grande capacité la perte n'est plus que de 0,45 p. 100.

Erreurs dans le mesurage résultant de l'inclinaison des compteurs.
(Valeurs des inclinaisons et erreurs correspondantes, au détriment de l'usine.)

CAPACITÉS des compteurs.	1° INCLINAISON D'ARRIÈRE EN AVANT, MESURÉE SUR LA LONGUEUR du compteur.				
	millim. p. 100	millim. p. 100	millim. p. 100	millim. p. 100	millim.
3 becs.	à 3 = 2	à 5 = 3	à 10 = 5	à 15 = 7	à 18
5	5 = 3	10 = 5	15 = 6	20 = 8	25
10	5 = 2,5	10 = 4	15 = 5	25 = 6,5	30
20	5 = 2	15 = 4,5	20 = 6	30 = 8	40
30	10 = 2,5	20 = 4,5	30 = 6	40 = 8	45
40	10 = 2,5	20 = 4	30 = 6	40 = 7,5	45
60	20 = 4	30 = 6	40 = 8	» »	45
80	20 = 5	30 = 6,5	40 = 8	» »	50
100	20 = 6	40 = 8	50 = 8	» »	65
150	20 = 6	40 = 7	60 = 9	» »	70

(Pour la dernière colonne : Le compteur ne marque plus.)

Capacités des compteurs.	2° Inclinaison de gauche a droite mesurée sur la distance horizontale entre les pieds.					
	millim. p. 100	millim. p. 100	millim. p. 100	millim. p. 100	millim.	
3 becs.	à 5 = 1,5	à 10 = 4	à 20 = 6	» »	à 25	Soupape fermée.
5	5 = 1	10 = 3	20 = 5	à 30 = 6	35	
10	5 = 1	10 = 2	20 = 3	35 = 4	40	
20	5 = 1	10 = 1,5	20 = 2,5	45 = 6,5	50	
30	5 = 1	10 = 1,5	20 = 2,5	45 = 6	50	
40	5 = 0,5	10 = 1	20 = 2	45 = 5	50	
60	10 = 1	20 = 2	30 = 3	40 = 4	50	
80	10 = 1	30 = 2,5	50 = 4	» »	60	
100	10 = 0,5	30 = 2	50 = 3	60 = 5	75	
150	20 = 1	40 = 2	60 = 3	» »	80	

Tableau de l'erreur due à la surcharge dans les compteurs neufs.

Capacité des compteurs.	Débits a l'heure.	Erreurs produites.
3 becs.	3 becs de chacun 120 litres = 360 litres.	Nulle.
»	6 — 120 = 720	1,5 p. 100 en moins.
»	9 — 120 = 1080	2 p. 100 en moins.
5 becs.	5 — 140 = 700	Nulle.
»	10 — 140 = 1 400	1,3 p. 100 en moins.
10 becs.	10 — 140 = 1 400	Nulle.
»	20 — 140 = 2800	1,5 p. 100 en moins.
20 becs.	20 — 140 = 2 800	Nulle.
»	40 — 140 = 5 600	1 p. 100 en moins.
40 becs.	40 — 140 = 5 600	Nulle.
»	80 — 140 = 11 200	0,6 p. 100 en moins.

L'erreur s'accroît sensiblement et varie suivant le degré d'encrassement des appareils; au bout de 4 à 5 ans, elle peut atteindre 3 p. 100 dans les compteurs de 3, 5 et 10 becs. Le débit maximum des compteurs toléré est de 175 litres par heure et par bec nominal.

Les compteurs actuellement employés suppriment les erreurs dues à l'évaporation de l'eau. Le compteur à cuiller compensateur, système Siry-Lizars, rend la mesure indépendante du niveau de l'eau. Le compteur à bâche saturatrice de P. Rouget a l'avantage de conserver le niveau d'eau constant dans les compteurs, l'évaporation se produisant dans la bâche. On emploie encore avec succès le compteur insiphonnable à mesure invariable de J. Brunt.

SÉCHAGE

700. Séchage à l'air libre. Les dispositions à adopter pour les bâtiments destinés à ce mode de séchage, usité principalement dans les blanchisseries, consistent : 1° à placer ces bâtiments dans un lieu où rien n'empêche la circulation de l'air; 2° à leur donner une grande élé-

vation, afin que les matières à sécher se trouvent dans un air plus sec et plus agité; 3° à laisser une libre circulation à l'air sur toutes les faces du bâtiment. Pour les séchoirs à colle, comme il serait dangereux d'y laisser pénétrer l'air chargé de vapeur, on garnit les ouvertures du bâtiment de jalousies que l'on ferme pendant les temps humides.

Ce mode de séchage est nécessairement irrégulier, puisqu'il dépend de l'état de l'atmosphère. L'humidité relative de l'atmosphère varie entre 0,50 et 0,90; le minimum a lieu généralement entre midi et 3 heures; c'est le moment préférable pour sécher. Mais il est moins aléatoire de recourir à des procédés artificiels.

701. Séchage produit par un courant d'air chauffé préalablement. Les matières à sécher sont disposées dans une chambre close munie de deux ouvertures, l'une pour l'entrée de l'air chaud, et l'autre pour la sortie de cet air, lorsque, amené en contact avec les matières à dessécher, il s'est saturé de vapeur. Quelle que soit la position de la première ouverture, l'air chaud gagne rapidement la partie supérieure du séchoir, d'où il doit descendre, en traversant uniformément chaque section horizontale, jusqu'au niveau du plancher, dans lequel ou près duquel se trouve pratiquée l'ouverture d'évacuation de l'air saturé. En plaçant l'orifice d'arrivée de l'air chaud près du plafond du séchoir, on conçoit que cet air ne monte pas à travers une partie des matières, et que le séchage est aussi régulier que possible. Les orifices de dégagement communiquent avec une cheminée d'appel, dont on peut augmenter le tirage au moyen d'un foyer spécial, ou bien, comme on le fait habituellement, en plaçant dans son intérieur la cheminée en tôle du calorifère. Les problèmes auxquels donne naissance ce mode de séchage pourront être résolus en suivant la marche que nous indiquons dans la solution des deux suivants, dont l'un est la réciproque de l'autre.

Premier problème. Soit à déterminer la quantité d'eau évaporée par 1 kilog. de houille, l'air saturé sortant du séchoir à 10°, et la température de l'air extérieur, supposé sec, étant 0°.

A la température de 10° et sous la pression de 0^{m},76, 1 mètre cube d'air saturé contenant 1^{k},2324 d'air, et 0^{k},0094 de vapeur dont la formation a absorbé 5,7033 unités de chaleur (601), la température de l'air à l'entrée du séchoir doit être, 0,2377 étant la chaleur spécifique de l'air (488) :

$$10 + \frac{5,7033}{0,2377 \times 1,2324} = 29°,5.$$

Supposant que 1 kilog. de houille produise 6000 unités de chaleur, il pourra élever $\frac{6000}{0,2377 \times 29,5} = 856$ kilog. d'air de 0° à 29°,5, dont le volume en air saturé sera $\frac{856}{1,2324} = 695$ mètres cubes; le poids d'eau qu'il vaporisera est donc $0,0094 \times 695 = 6^{k},5$.

Par des calculs semblables, supposant toujours l'air primitivement

sec et à 0°, on trouverait que la quantité d'eau vaporisée par kilog. de houille croît sensiblement avec la température de l'air saturé; mais que, pour un léger accroissement de cette température, celle de l'air à son entrée dans le séchoir augmente d'une quantité considérable. Ordinairement l'air sort du séchoir entre 30° et 40°.

Deuxième problème. Soit à évaporer 50 kilog. d'eau en une heure, la température de l'air saturé au sortir du séchoir étant 35° et la température de l'air extérieur étant 15°.

Pour l'établissement des appareils destinés à opérer ce mode de séchage, il faut toujours se placer dans les conditions les plus défavorables d'état hygrométrique (740) et de température de l'air extérieur; ainsi il convient de supposer cet air entièrement saturé, et à une température supérieure à la température moyenne à laquelle il se trouvera pendant tout le temps que fonctionnera l'appareil. Dans le nord de la France, pour un appareil permanent, il convient de supposer l'air extérieur à 15° et complètement saturé. A 35° et sous la pression de $0^m,76$, un mètre cube d'air saturé contient $0^k,0393$ de vapeur, et à 15° il en contient $0^k,0127$ (601). Par conséquent, en passant de 15° à 35°, chaque mètre cube d'air dissoudra, en négligeant la dilatation de l'air, $0,0393 - 0,0127 = 0^k,0266$ d'eau. Pour dissoudre les 50 kilog., il faudra donc $\frac{50}{0,0266} = 1\,880$ mètres cubes d'air à 35°, dont le poids est (601) $1,0829 \times 1\,880 = 2\,036$ kilog.

La quantité de chaleur que perd l'air chaud pour dissoudre à 35° les 50 kilog. d'eau à 15° est $50(606,5 + 0,305 \times 35) - 15 \times 50 = 30\,109$ unités.

Supposant que les quatre pertes dont il va être question équivalent approximativement à cette dépense de chaleur, la température de l'air à l'entrée du séchoir doit être de :

$$35 + \frac{60\,218}{0,305 \times 50 + 0,2377 \times 2036} = 156°.$$

Suivant que la température à la sortie du séchoir serait de 30° ou de 40°, on trouverait par la même marche 107° ou 216° pour la température de l'air à son entrée dans le séchoir.

La quantité totale de chaleur dépensée se compose, en outre des 60218 unités précédentes, de la chaleur nécessaire pour porter l'air de 15° à 35°, ainsi que la vapeur contenue dans l'air à 15°; elle est donc :

$$60\,218 + 0,2377 \times 2036 \times 20 + 0,305 \times 20 \times 0,0127 \times 1\,880 = 70\,043.$$

Si l'air qui entre dans le séchoir a servi à la combustion, le poids de combustible à brûler s'obtient en divisant 70043 par la puissance calorifique du combustible; si au contraire l'air qui entre dans le séchoir n'a été chauffé qu'indirectement, il y a à peu près 25 p. 100 de la chaleur perdue (718), et le poids de combustible à brûler s'obtient en divisant 70043 par les 0,75 de la puissance calorifique. Ayant la quantité de combustible à brûler, on détermine la surface de la grille (742) et la section de la cheminée (544).

Quant à la section de la cheminée d'appel, en négligeant les frottements et autres résistances, la formule (α) du n° 540 donne pour la vitesse théorique d'accès u de l'air froid, en supposant que la hauteur verticale est $H=8^m$ pour le tuyau d'air chaud, qui débouche au sommet du séchoir, $H'=6^m$ pour le séchoir (hauteur H' qui est descendante) et $H''=12^m$ pour la cheminée, qui part du bas du séchoir, et en remarquant que $\theta=15°$, $t=156°$, $t'=\frac{156+35}{2}=95°,5$ et $t''=35°$,

$$u=\sqrt{2\times9,8088\times0,004\left[\frac{8(156-15)}{1+0,004\times156}-\frac{6(95,5-15)}{1+0,004\times95,5}+\frac{12(35-15)}{1+0,004\times35}\right]}=6^m,6$$

Le volume d'air froid appelé par seconde étant de $1880:3600=0^{mc},522$, la section d'entrée de cet air devrait être de $0,522:6,605=0^{mq},079$, et la tension de l'air sec dans l'air saturé à 35° étant de $0^m,7182$ de mercure (601), la section de la cheminée devrait être de $0,079\times\frac{0,76}{0,7182}=0^{mq},084$. Mais à cause des frottements et autres causes de diminution de vitesse, on doit doubler ces sections, qui deviennent $0^{mq},16$ pour l'admission de l'air froid, c'est-à-dire pour les carnaux de l'air chaud, et $0^{mq},17$ pour la cheminée.

Si au lieu de doubler la section théorique de la cheminée on la triplait ou quadruplait, les résistances y deviendraient à peu près nulles, et le tirage serait augmenté; on aurait alors à craindre l'action des vents, à laquelle on pourrait se soustraire en rétrécissant l'orifice supérieur de la cheminée, de manière que les sections de sortie et d'entrée soient égales. Dans tous les cas, il est utile de garnir le sommet de la cheminée d'un chapeau qui s'oppose à l'influence des vents, ou qui fait même concourir la vitesse du vent au tirage.

Évaluons les pertes de chaleur dont il a été parlé ci-dessus.

1° La première de ces pertes est due à l'air qui s'échappe non entièrement saturé vers la fin du séchage. Il est impossible de l'apprécier exactement; on peut parvenir à le réduire à peu de chose par une bonne répartition des matières dans tout le séchoir, et par l'ouverture ou la fermeture faites à propos d'orifices d'air sec ou d'air saturé. Si l'on estime que dans le projet qui nous occupe, il s'échappe ainsi 200^{mc} d'air par heure à la température moyenne 95°,5 du séchoir, le poids de cet air est de $\frac{1,293}{1+0,004\times95,5}\times200=187$ kilog. (483, 540), et il occasionne une perte de chaleur de :

$$0,2377\times187(95,5-15)=3578 \text{ unités.}$$

2° La chaleur contenue dans les matières sèches qu'on retire du séchoir constitue la deuxième perte. Supposant que pour les 50 kilog. d'eau vaporisés on obtienne 140 kilog. de matières sèches, ce qui est à peu près la proportion des étoffes de calicot passés à l'essoreuse, si la chaleur spécifique de la matière sèche est 0;54, comme pour le linge et

les bois, la deuxième perte de chaleur s'élève à :

$$0{,}54 \times 140(95{,}5 - 15) = 6086 \text{ unités.}$$

3° Quand on ouvre le séchoir pour remplacer les matières sèches par des matières chargées d'eau, l'air chaud qui le remplit est presque toujours remplacé par de l'air extérieur, et il en résulte une troisième perte de chaleur. Le séchoir ayant $10^{m},50$ de longueur, 8^{m} de largeur, 6^{m} de hauteur, et par suite 504^{mc} de capacité, si la durée d'une opération est de trois heures, pour une heure le renouvellement d'air est de $504 : 3 = 168^{mc}$, et il occasionne une perte de chaleur qu'on peut calculer comme la première perte, et qui est par conséquent de :

$$3578 \times \frac{168}{200} = 3006 \text{ unités.}$$

4° Une quatrième perte de chaleur est due à l'échauffement des murailles, et à la transmission de la chaleur à travers leur épaisseur et à travers les vitres. Si le travail est continu, la perte due à l'échauffement des murailles est négligeable; supposons cette perte égale à 1 000 unités en moyenne par heure dans le projet qui nous occupe.

Supposons que les murailles ont 6^{m} de hauteur et $0^{m},40$ d'épaisseur, et qu'elles sont exposées à l'air à peu près dans les conditions de la formule (α) du n° 709. De cette formule on conclut pour la chaleur qui traverse 100^{mq} de murailles en une heure, en remarquant que $C = 1{,}70$, $k = 3{,}60$, $k' = 1{,}764 + \frac{0{,}636}{\sqrt{6}} = 2{,}024$, $Q = k + k' = 5{,}624$,

$T = \frac{156 + 35}{2} = 95°{,}5$, $T' = 15°$ et $E = 0^{m},40$,

$$M \times 100 = \frac{1{,}70 \times 5{,}624\,(95{,}5 - 15)}{2 \times 1{,}70 + 5{,}624 \times 0{,}40} \times 100 = 136{,}22 \times 100 = 13\,622 \text{ unités.}$$

Si les vitres ont 2^{m} de hauteur et une surface totale de 11^{mq}, la formule (β) du n° 710 donne pour la chaleur qui les traverse en une heure, en remarquant que $k = 2{,}91$, $k' = 1{,}764 + \frac{0{,}636}{\sqrt{2}} = 2{,}214$, $Q = k + k' = 5{,}124$,

$$M \times 11 = \frac{95{,}5 - 15}{2} \times 5{,}124 \times 11 = 206{,}24 \times 11 = 2269 \text{ unités.}$$

La quatrième perte de chaleur est donc, par heure, de :

$$1000 + 13\,622 + 2269 = 16\,891 \text{ unités.}$$

La somme des quatre pertes est alors de :

$$3578 + 6086 + 3006 + 16\,891 = 29\,561 \text{ unités.}$$

Cette somme diffère trop peu de la valeur 30 109 unités que nous lui avons attribuée ci-dessus, pour qu'on ne considère pas tous les résultats que nous venons d'obtenir comme satisfaisant au projet. Si la différence était assez grande, on ajouterait cette somme aux 30 109 unités de chaleur nécessaires pour vaporiser l'eau, et, recommençant tous les calculs,

on obtiendrait, en général, des résultats satisfaisants, sans qu'on fût obligé de recommencer les calculs une seconde fois.

M. Lacambre, dans une touraille continue construite à Louvain, a établi, pour chauffer l'air, un calorifère dont la surface de chauffe est de 100^{mq}; en 24 heures il brûle 800 kilog. de houille, et sèche 50 hectolitres de malt, renfermant chacun de 27 à 36 kilog. d'eau; ce qui donne seulement une évaporation de $1^k,7$ à $2^k,2$ d'eau par kilog. de houille. Ce peu d'effet est dû en grande partie à l'impossibilité de saturer complètement l'air dans le séchage des matières pulvérulentes.

702. Séchage par l'air froid préalablement desséché. Ce mode de dessiccation peut s'appliquer à la colle, qu'on ne doit pas soumettre, lorsqu'elle est en gelée, à une température supérieure à 35° environ.

Supposons qu'il s'agisse d'obtenir 500 kilog. de colle sèche, l'air desséché étant à 10°. La colle en gelée contenant des 2/3 aux 5/6 de son poids d'eau, il faudra donc, en adoptant la proportion 2/3, qui est celle des colles communes, pour obtenir les 500 kilog. de colle sèche, évaporer 1000 kilog. d'eau; or un mètre cube d'air saturé à 10° contenant $0^k,0094$ d'eau (601), il faudra donc, pour dissoudre les 1000 kilog. d'eau, faire passer sur la colle $\frac{1000}{0,0094} = 106\,383^{mc}$ d'air sec.

Pour faire l'appel de ces 106383^{mc} d'air, il faudrait brûler environ 100 kilog. de houille, qui coûteraient 5 fr. à Paris; au moyen d'un ventilateur, cet appel pourrait coûter 4 fr. (550).

La perte sur la chaux employée à dessécher l'air ne peut qu'être faible, si l'on a soin de ne lui faire absorber que la moitié de son poids d'eau; car, à cet état, elle est encore propre aux constructions.

703. Séchage des étoffes. Selon que les étoffes en sortant de l'eau ont été simplement tordues, soumises à l'action d'une presse puissante, ou essorées, elles contiennent, pour 1 kilog. d'étoffe, les poids d'eau suivants, d'après M. Rouget de Lisle (*Bulletin de la Société d'encouragement*, tome L) :

	Flanelle.	Calicot.	Soie.	Toile de lin.
Tordage	$2^{kg},00$	$1^{kg},00$	$0^{kg},95$	$0^{kg},75$
Pressage.	1 ,00	0 ,60	0 ,50	0 ,40
Essorage.	0 ,60	0 ,35	0 ,30	0 ,25

Pour obtenir ces derniers résultats, la caisse mobile de l'essoreuse doit avoir $0^m,80$ de diamètre et faire de 500 à 600 tours par minute.

Dans les lavoirs, 1 kilog. de linge sec retient 1 kilog. d'eau quand après le lavage il n'est qu'égoutté; mais à l'essoreuse faisant de 700 à 800 tours il perd la moitié de cette eau en quelques minutes. En étendant ensuite le linge en plein air sur des cordes en crin ou en fil de fer galvanisé, espacées de $0^m,40$ à $0^m,50$, le séchage se fait rapidement s'il fait du soleil et si l'air est agité. Comme il n'en est pas de même par les temps humides, surtout en hiver, on établit souvent, pour se mettre à l'abri de la pluie, des séchoirs couverts munis de persiennes qui permettent à l'air de circuler librement.

Les essoreuses sont composées d'un récipient en toile métallique à

mailles serrées mobile autour d'un axe, et d'un second vase fixe, en tôle ou en fonte, plus grand que le premier, qui recueille l'eau projetée. Leurs formes et leurs dimensions varient suivant leur usage. Dans les petites essoreuses employées dans les établissements de bains et les lavoirs publics, le vase mobile est un cylindre en fil de fer galvanisé de $0^m,60$ de diamètre sur $0^m,15$ de hauteur; son arbre est vertical, et on lui communique le mouvement à l'aide d'une manivelle, par l'intermédiaire de deux roues s'engrenant avec deux pignons. L'une de ces roues et son pignon sont coniques, et souvent remplacés par deux cônes métalliques de friction dont l'un est recouvert de cuir. La femme, après avoir placé son linge dans le récipient, tourne la manivelle. L'essorage peut être employé sans inconvénient pour le linge le plus fin; avec une vitesse de rotation suffisante le linge fin peut être amené au point de dessiccation convenable pour le repassage.

D'après M. Schlumberger, 2 hommes, en une heure, ont enlevé 151 kilog. d'eau en poussant la dessiccation aussi loin que le permettait l'essoreuse.

Les séchoirs usités dans les fabriques de toiles peintes consistent en une tour carrée assez élevée, à la partie supérieure de laquelle règne une galerie faisant saillie. Quand le temps est beau, les étoffes sèchent extérieurement en les suspendant à la galerie, et pendant les temps humides elles se sèchent intérieurement par des courants d'air chaud dirigés de bas en haut. L'air chaud devant nécessairement, en se dégageant à la partie supérieure, sortir sans être complètement saturé, on ne doit obtenir que peu d'effet du combustible.

Dans des expériences faites à Mulhouse, en 1839, par M. Penot, 1 kilog. de houille n'a vaporisé que $1^{kg},36$ d'eau pour un séchoir, et seulement $1^{kg},02$ pour un autre; dans ce dernier, dont les murs étaient minces et percés d'un grand nombre de fenêtres, la température n'a pu être portée au delà de 30°. En fermant les soupiraux qui se trouvent à la partie supérieure du séchoir, 1 kilog. de houille a vaporisé $1^{kg},68$ d'eau. Le séchoir avait 2983^{mc} de capacité, et $9^m,60$ de hauteur, et il était garni de trois soupiraux ayant chacun $1^{mq},6$ de section. Les toiles renfermaient 1054 kilog. d'eau, et ont été introduites d'une seule fois; le séchoir n'était pas complètement fermé. Dans une expérience faite dans des conditions plus favorables, 1 kilog. de houille a vaporisé $2^{kg},86$ d'eau. Quand les séchoirs sont bien fermés et qu'on peut élever la température à 45 ou 50°, il y a économie à n'ouvrir les soupiraux que quand les toiles sont sèches, et il est toujours avantageux d'élever la température autant que possible.

Si au lieu d'opérer par intermittence, on rend le séchage continu en remplaçant au fur et à mesure les pièces d'étoffe sèches par des pièces humides, on augmente l'effet du combustible. D'après M. Royer, dans un étendage ayant $9^m,68$ de longueur, $8^m,20$ de largeur et $19^m,28$ de hauteur, la surface de chauffe du calorifère étant de $70^{mq},5$ et la consommation moyenne de houille 25 kilog. à l'heure, trois expériences, qui ont duré chacune 15 jours, ont donné un effet utile moyen de $2^{kg},37$,

$2^{kg},53$ et $2^{kg},18$ d'eau évaporée par kilog. de houille. Ces séchoirs ont une trop grande surface extérieure. En leur donnant une faible hauteur, en faisant évacuer l'air par le bas et en rendant l'opération bien continue, on augmenterait l'effet du combustible.

Dans un séchoir de M. René-Duvoir, pour blanchisserie, les pièces de calicot sont suspendues verticalement aux solives d'un plancher à claire-voie, sur lequel marchent les ouvriers pour placer ou retirer les étoffes. Trois calorifères, placés sous le sol du séchoir, lancent l'air à la température moyenne de 120° dans un canal en briques, d'où il s'échappe au niveau du sol par un grand nombre d'ouvertures garnies de coulisses. L'air chaud s'élève d'abord, et il est ensuite obligé de redescendre pour gagner les orifices d'évacuation placés au niveau du sol. Au commencement de l'opération, on ouvre aussi des orifices d'évacuation placés au milieu de la hauteur du séchoir. En 6 heures, on sèche 150 pièces de calicot qui contiennent 1130 kilog. d'eau, et la consommation de houille est de 1 kilog. par $3^{kg},52$ d'eau évaporée. Le volume d'air lancé dans le séchoir était de 55000^{m^3}. La température extérieure étant de 25°, on a trouvé que la température à la sortie des cheminées était de 38°; d'où il résulte que l'air est loin d'être saturé. C'est surtout vers la fin des opérations qu'il y a une grande perte de chaleur; et il est impossible de répartir uniformément l'air dans toutes les parties du séchoir.

En faisant avancer d'une manière continue une pièce d'étoffe à l'aide de rouleaux convenablement disposés, et en obligeant par des cloisons fixes horizontales l'air à marcher en sens contraire de l'étoffe, on conçoit que le séchoir peut être réduit à une simple caisse.

Séchage des étoffes par le contact des surfaces métalliques. Clément, en appliquant une pièce de calicot pesant $2^{kg},50$ et contenant un égal poids d'eau, sur une plaque de cuivre d'une surface égale à la sienne, et chauffée par la vapeur à 100°, a obtenu sa dessiccation en une minute. Dans cette expérience, la quantité d'eau évaporée par mètre carré de surface de cuivre a été $6^{kg},94$ par heure.

Dans les fabriques, on sèche les étoffes en les faisant passer sur des cylindres en fonte chauffée intérieurement par la vapeur.

D'après des expériences de M. Royer, 20 pièces de calicot sortant de la presse et pesant 150 kilog. d'eau ont été séchés en 3 heures 1/2; leur poids a été réduit à 76 kilog., et les 74 kilog. d'eau ont condensé 102 kilog. de vapeur; de sorte qu'en admettant qu'un kilog. de houille produit 5 kilog. de vapeur, la quantité d'eau évaporée par kilog. de houille a été de $5\,\frac{74}{102} = 3^{kg},63$. La machine était à un cylindre, l'eau de condensation était bouillante et la pression dans la chaudière était de $1^m,37$ de mercure. D'autres expériences faites avec une machine à 6 cylindres n'ont donné que $2^{kg},45$ d'eau évaporée pour un kilog. de houille, mais en hiver et dans une salle mal fermée où la température était voisine de zéro.

704. Puissance d'absorption des matériaux de construction, et temps

nécessaire à leur séchage naturel. Voici quelques chiffres donnés par M. C. Tollet au Congrès d'hygiène, à l'Exposition universelle de 1889.

1° *Quantité d'eau que peuvent absorber les matériaux de construction les plus usuels.* (Les chiffres ci-dessous ont été déduits d'expériences faites sur 60 échantillons) :

	Par décim. cube.		
Plâtre cuit pulvérisé et réduit en bloc	400	à	425gr
Mosaïque composée de mortier de chaux hydraulique et de petits cailloux concassés	»		280
Ciments et dalles	80		200
Calcaires tendres ou grossiers	140		335
— durs	120		170
Meulières	80		200
Ardoises	10		90
Tuiles	26		290
Briques	60		325
Carreaux	»		20
Grès	»		15
— cérame	5		50
Bois de chêne	»		45
— de sapin	»		50

L'absorption maxima ou à saturation ne se produit pas dans les mêmes délais, ni avec la même progression; il y a des différences très marquées jusque dans des matériaux similaires et de même catégorie. Ainsi pour la tuile et l'ardoise la saturation se produit en moyenne au bout de six heures d'immersion, tandis que pour les briques il suffit de deux heures. Le ciment, les pierres meulières, les calcaires durs et les bois emploient un délai compris entre deux et six heures. Les grès n'emploient que deux heures à absorber une petite quantité d'eau.

2° *Temps nécessaire à la dessiccation.* La dessiccation naturelle est très lente pour la plupart des matériaux. Les calcaires tendres n'ont perdu que 1 1/2 de leur eau d'absorption au bout de 64 heures; les meulières, les 4/5; le sapin, 1/10; les calcaires durs et le chêne, 1/3; les briques et le ciment, au bout de ce temps, ont perdu la moitié de leur eau d'absorption. Certaines ardoises, tuiles et briques, les carreaux en grès, le grès cérame, le bois de sapin, sont les matériaux les plus hydrofuges: leur siccité est à peu près complète au bout de quelques heures, et comme ce sont aussi ces matériaux qui absorbent le moins d'eau, ils doivent être préférés. Lorsque la brique est beaucoup plus chère que les moellons, ce qui arrive dans bien des localités, il faut l'employer au moins comme chemise interne pour éviter toute humidité.

CHAUFFAGE

705. Perte de chaleur due au rayonnement des corps dans une enceinte fermée (467). La température d'un corps restant constante et comprise entre 22 et 65°, et celle de l'enceinte étant de 12°, la quantité de chaleur

émise par rayonnement est, par mètre carré et par heure, la surface du corps étant convexe :

$$R = kt(1 + 0{,}0056\,t). \qquad (1)$$

R chaleur émise en unités (ou *calories*) (486);
t excès constant de la température du corps sur celle de l'enceinte;
k nombre constant qui dépend de la nature de la surface du corps, et dont la valeur est indiquée au tableau suivant, d'après Péclet :

Argent poli	0,13	Tôle oxydée	3,36	Noir de fumée	4,01
Papier argenté	0,42	Fonte neuve	3,17	Pierre à bâtir	3,60
Laiton poli	0,258	— oxydée	3,36	Plâtre	3,60
Papier doré	0,23	Verre	2,91	Bois	3,60
Cuivre rouge	0,16	Craie en poudre	3,32	Étoffe de laine	3,68
Zinc	0,24	Poussière de bois	3,53	Calicot	3,65
Étain	0,215	Charbon en poudre	3,42	Étoffes de soie	3,71
Tôle polie	0,45	Sable fin	3,62	Eau	5,31
— plombée	0,65	Peinture à l'huile	3,71	Huile	7,24
— ordinaire	2,77	Papier	3,77		

Pour le papier et les étoffes la couleur est sans influence.

Pour des températures t' de l'enceinte qui ne différeraient de 12° que de quelques unités, on multiplierait les valeurs de k du tableau précédent par $1 + 0{,}0037(t' - 12)$.

D'après Dulong, la chaleur rayonnée (nombre de calories) par mètre carré et par heure est représentée par la formule :

$$R = ma^{\theta}(a^{t} - 1). \qquad (2)$$

θ température de l'enceinte;
t excès de la température du corps sur celle de l'enceinte;
a nombre constant égal à 1,0077;
m nombre constant qui dépend de la nature de la surface du corps, et que, d'après Péclet, il convient de faire égal à $124{,}72k$ quand l'enceinte est à surface terne, ce qui a presque toujours lieu, excepté dans les laboratoires.

Dulong a vérifié sa formule pour des excès de température s'élevant jusqu'à 260°, et Péclet conseille de l'employer toutes les fois que la température de l'enceinte diffère notablement de 12° et quand l'excès de température n'est pas compris entre 25° et 65°.

706. Perte de chaleur due au contact de l'air. Cette perte est indépendante de la nature de la surface du corps et de la température de l'enceinte; elle ne dépend que de l'excès de la température du corps sur celle de l'enceinte, et de la forme et des dimensions du corps. Dans tous les cas, elle est représentée, pour un excès de température compris entre 25° et 65°, pour un mètre carré et pour une heure, par la formule:

$$A = k't(1 + 0{,}0073\,t). \qquad (3)$$

t excès constant de température;
k' nombre qui varie avec la forme et la dimension du corps, et qui est égal à :

$1{,}778 + \dfrac{0{,}13}{r}$ pour les corps sphériques de rayon r,

$2{,}058 + \dfrac{0{,}0382}{r}$ pour les cylindres horizontaux de rayon r,

$\left(0,726+\frac{0,0345}{\sqrt{r}}\right)\left(2,43+\frac{0,8758}{\sqrt{h}}\right)$ pour les cylindres verticaux de rayon r et de hauteur h,

$1,764+\frac{0,636}{\sqrt{h}}$ pour les surfaces planes verticales de hauteur h.

Dulong a donné la formule suivante pour exprimer la perte de chaleur due au contact de l'air :

$$A = m't^{1,233}. \qquad (4)$$

t excès constant de température;
m' nombre que Péclet fait égal à $0,552k'$.

Cette formule de Dulong s'accorde avec les expériences de Péclet, et comme elle a été vérifiée pour un grand excès de température, il y a lieu de l'employer toutes les fois que l'excès de température dépasse 65°.

707. **La perte totale de chaleur due au rayonnement et au contact de l'air** est donc, par mètre carré et par heure, pour des excès t de température compris entre 25° et 65° et pour une température de l'enceinte très peu différente de 12° :

$$M = R + A = kt(1 + 0,0056t) + k't(1 + 0,0073t), \qquad (5)$$

ou, en négligeant les termes du second degré, ce que l'on peut faire pour de petits excès t :

$$M = R + A = (k + k')t; \qquad (6)$$

cette dernière formule exprime la loi de Newton.

Dans toutes les autres circonstances, on pourra poser :

$$M = R = A = ma^{\theta}(a^{t} - 1) + m't^{1,233}. \qquad (7)$$

Pour un tuyau en fonte chauffé intérieurement par de la vapeur à 100° et placé dans une enceinte à la température constante de 15°, cas qui se présente souvent, si le rayon r du tuyau est de $0^{m},05$, faisant dans la formule (7) $m = 124,72 \times 3,36 = 419,06$ $a = 1,0077$, $\theta = 15$, $t = 85$, $m' = 0,552\left(2,058 + \frac{0,0382}{0,05}\right) = 1,558$, il vient :

$$M = R + A = 419,06 \times 1,0077^{15}(1,0077^{85} - 1) + 1,558 \times 85^{1,233}$$
$$= 432,26 + 372,86 = 805.$$

Pour $r = 0^{m},10$ et $r = 0^{m},15$, on aurait respectivement :

$$M = R + A = 432,26 + 322,34 = 755,$$
$$M = R + A = 432,26 + 305,52 = 738.$$

La chaleur latente de la vapeur d'eau à 100° étant 537 (490), les trois valeurs précédentes de M correspondent respectivement à $1^{kg},52$, $1^{kg},42$ et $1^{kg},39$ de vapeur condensée. Ces poids sont un peu moindres que ceux

qui résultent de l'observation directe, probablement à cause de l'eau entraînée mécaniquement par la vapeur (721).

La *chaleur transmise par un tuyau renfermé dans un canal parcouru par l'air* est sensiblement la même que celle que le tuyau perdrait à l'air libre [formules (5), (6) et (7)], en prenant pour t l'excès de la température du tuyau sur la température moyenne de l'air qui parcourt le canal. Le rayonnement du cylindre échauffe la surface intérieure du canal, et l'air s'échauffe par son contact avec la surface de ce canal; ce qui fait que la chaleur acquise par l'air est égale à celle que perd le cylindre par contact et par rayonnement. Ce cas se présente dans un grand nombre de calorifères. La section du canal n'ayant que peu ou point d'influence, si le tuyau circule dans une pièce à chauffer, la chaleur transmise conserve la même expression.

Lorsque l'air qui s'échauffe circule à l'intérieur du tuyau, circonstance qui se présente dans un grand nombre de calorifères à air chaud, le refroidissement du tuyau par rayonnement disparaît complètement, et l'on peut admettre, sans erreur sensible, que la quantité de chaleur transmise à l'air par le tuyau est égale à celle que le tuyau émettrait à l'air libre, par contact, formules (3) et (4), en prenant pour t, comme dans le cas précédent, l'excès de la température du cylindre sur la température moyenne de l'air à l'entrée et à la sortie.

708. Transmission de la chaleur à travers les corps. La quantité de chaleur qui traverse une plaque à surfaces planes et parallèles est, par mètre carré et par heure :

$$M = (t - t')\frac{C}{E}. \qquad (8)$$

t et t' températures constantes des surfaces de la plaque;
E épaisseur de la plaque en mètres;
C est la valeur de M pour $t - t' = 1°$ et pour $E = 1$ mètre; le tableau (p. 893) donne cette valeur pour différents corps.

709. Transmission de la chaleur à travers les murailles. Considérons d'abord le cas d'une *enceinte fermée par des murailles dont une seule est exposée à l'air extérieur*, et appelons :

t et t' les températures des faces intérieure et extérieure d'une muraille;
T la température de l'air intérieur de l'enceinte;
T' la température de l'air extérieur;
$Q = k + k'$;
M la quantité de chaleur qui traverse la muraille par mètre carré et par heure, en unités (ou *calories*).

Quand le régime est établi, et qu'on a $T > T'$, on a $T > t$, $t > t'$, et $t' > T'$; de plus, la quantité M de chaleur qui traverse la muraille est égale à celle qui pénètre dans la muraille par sa face intérieure et qui en sort par sa face extérieure. Il en résulte donc, comme on peut admettre que le réchauffement de la face intérieure et le refroidissement de la face extérieure s'effectue suivant les mêmes lois, que l'on peut écrire à l'aide de la formule (8) et de l'une de celles (5), (6) et (7), trois

DÉSIGNATION DES MATIÈRES.	DENSITÉS.	VALEURS DE C.
1° *Matières continues, ou dont les parties sont agglomérées.*		
Or.	»	77,00
Platine.	»	75,00
Argent.	»	74,00
Cuivre.	»	69,00
Fer.	»	28,00
Zinc.	»	28,00
Etain.	»	22,00
Plomb.	»	14,00
Charbon des cornues à gaz.	1,61	4,96
Marbre gris à grains fins.	2,68	3,48
Marbre blanc saccharoïde à gros grains.	2,77	2,78
Pierre calcaire à grains fins.	2,34	2,08
Id.	2,27	1,69
Id.	2,17	1,70
Pierre de liais à bâtir à gros grains.	2,24	1,32
Id.	2,22	1,27
Plâtre ordinaire gâché.	»	0,331
Id. très fin, gâché.	1,25	0,520
Plâtre de moulage très fin, gâché.	1,25	0,44
Plâtre aluné, gâché.	1,73	0,63
Terre cuite.	1,98	0,69
Id.	1,85	0,51
Bois de sapin, transmission perpendiculaire aux fibres	0,48	0,093
Id parallèle aux fibres.	0,48	0,170
Bois de noyer, transmission perpendiculaire aux fibres	»	0,103
Id. parallèle aux fibres.	»	0,174
Bois de chêne, transmission perpendiculaire aux fibres	»	0,211
Liége.	0,22	0,143
Caoutchouc.	»	0,170
Gutta-percha.	»	0,172
Colle d'amidon.	1,017	0,425
Verre.	2,44	0,75
Id.	2,55	0,88
2° *Matières pulvérulentes.*		
Sable quartzeux.	1,47	0,27
Brique pilée, gros grains.	1,00	0,139
Brique pilée, passée au tamis de soie.	1,16	0,165
Brique en poudre fine obtenue par décantation.	1,55	0,140
Craie en poudre un peu humide.	0,92	0,108
Craie en poudre lavée et séchée.	0,85	0,086
Craie en poudre lavée, séchée et comprimée.	1,02	0,103
Fécule de pomme de terre.	0,71	0,098
Cendres de bois.	0,45	0,066
Poudre de bois d'acajou.	0,31	0,065
Charbon de bois ordinaire en poudre.	0,49	0,079
Braise de boulanger en poudre passée au tamis de soie	0,25	0,068
Charbon de bois ordinaire en poudre passée au tamis de soie.	0,41	0,081
Coke pulvérisé.	0,77	0,160
Limaille de fer.	2,05	0,158
Bioxyde de manganèse.	1,46	0,163
3° *Matières filamenteuses.*		
Coton en laine, quelle que soit sa densité.	»	0,040
Molleton de coton, *id.*	»	0,040
Calicot neuf, *id.*	»	0,050

DÉSIGNATION DES MATIÈRES.	DENSITÉ.	VALEURS DE C.
Laine cardée, quelle que soit sa densité.	»	0,044
Molleton de laine, *Id.*	»	0,024
Edredon, *Id.*	»	0,039
Toile de chanvre neuve	0,54	0,052
Id. vieille	0,58	0,043
Papier blanc à écrire	0,85	0,043
Papier gris non collé	0,48	0,034

expressions de la valeur de M, desquelles on peut tirer en fonction des quantités connues, non seulement M, mais aussi les températures t et t', qu'il est impossible de déterminer expérimentalement. Comme en faisant usage de la formule (7) de Dulong, le calcul serait difficile, et qu'en admettant celle plus simple (5) on arriverait encore à une équation du second degré assez compliquée, Péclet a admis la formule (6) de Newton, qui est suffisante pour de faibles excès de température. On a donc :

$$M = (t - t')\frac{C}{E}, \quad M = Q(T - t), \quad M = Q(t' - T');$$

d'où :

$$t = \frac{T(C + QE)\,T'C}{2C + QE}, \quad t' = \frac{T'(C + QE) + TC}{2C + QE}, \quad M = \frac{CQ(T - T')}{2C + QE}. \qquad (\alpha)$$

Pour un mur de 10 mètres de hauteur, en pierre calcaire, on a :

$$C = 1{,}70, \quad Q = k + k' = 3{,}60 + 1{,}96 = 5{,}56,$$

et si l'on suppose $T' = 6^\circ$, et $T = 15^\circ$, température ordinaire des lieux habités, ces formules donnent pour :

$E =$	0m,10	0m,20	0m,30	0m,40	0m,50	0m,60	0m,70	0m,80	0m,90	1m,00
$t =$	11°,15	11°,61	12°,00	12°,31	12°,96	12°,77	12°,96	13°,11	13°,24	13°,29
$t' =$	10°,00	9°,66	9°,38	9°,16	8°,99	8°,83	8°,71	8°,60	8°,50	8°,37
$M =$	25,40	22,25	19,84	17,85	16,23	14,95	13,81	12,84	12,00	11,20

Ce qui précède suppose que les autres murailles de l'enceinte sont sensiblement à la température de l'air intérieur; ce qui ne pourrait plus avoir lieu si toutes les murailles étaient exposées à l'air extérieur. Dans ce cas, toutes les surfaces intérieures étant sensiblement à la même température, leur rayonnement réciproque est sans influence, et l'on conçoit que, pour des valeurs égales de T et de T′, la quantité de chaleur transmise, dans les mêmes circonstances, par mètre carré et par heure, est plus petite que dans le cas précédent. Le rayonnement intérieur étant sans influence, on a :

$$M = (t - t')\frac{C}{E}, \quad M = k'(T - t); \quad M = Q(t' - T');$$

d'où :

$$t = \frac{Q(Ek'T + CT') + Ck'T}{C(Q + k') + QEk'}, \quad t' = \frac{Q(Ek'T' + CT') + Ck'T}{C(Q + k') + QEk'}, \quad M = \frac{k'CQ(T - T')}{C(Q + k') + QEk'}.$$

Pour les valeurs précédentes de C, k, k', T et T', on conclut pour :

E = 0m,10	0m,20	0m,30	0m,40	0m,50	0m,60	0m,70	0m,80	0m,90	1m,00
t = 8°,86	9°,31	9°,70	10°,03	10°,33	10°,60	10°,85	11°,04	11°,23	11°,24
t' = 8°,16	8°,00	7°,86	7°,74	7°,64	7°,55	7°,46	7°,39	7°,32	7°,26
M = 12,01	11,13	10,38	9,71	9,14	8,62	8,16	7,75	7,37	7,03

710. Transmission de la chaleur à travers les vitres. Examinons les deux cas extrêmes : celui où les vitres sont placées dans la seule face de l'enceinte exposée à l'air extérieur, et celui où toute l'enceinte est vitrée et exposée à l'air extérieur.

Dans le premier cas, les rayons de chaleur obscure ne traversant pas le verre (468), les vitres s'échauffent d'un côté par le rayonnement des surfaces intérieures que l'on peut supposer à la température T, et par le contact de l'air chaud; de l'autre côté, elles se refroidissent par des causes analogues. En admettant que le réchauffement et le refroidissement s'effectuent de la même manière, pour les mêmes excès de température, et en remarquant que, pour les petites épaisseurs des vitres, on peut supposer que les quantités de chaleur transmises sont indépendantes de leur épaisseur (709), on a, en désignant par θ la température moyenne de la vitre :

$$M = (T - \theta)Q, \qquad M = (\theta - T')Q;$$

d'où :
$$\theta = \frac{T + T'}{2}, \qquad M = \frac{T - T'}{2} Q. \qquad (\beta)$$

De ces formules, en faisant $k = 2,91$ (705), et $T' = 6°$, $T = 15°$; d'où $\theta = 10°,5$, on tire, en adoptant pour les hauteurs de vitres :

	1m	2m	3m	4m	5m
k' =	2,40	2,21	2,13	2,08	2,05
M =	23,85	23,04	22,68	22,46	22,32
M =	2,650	2,560	2,520	2,496	2,479

Ces dernières valeurs de M, obtenues en divisant les premières par 15 — 6, correspondent à une différence $T - T' = 1°$.

Pour une enceinte entièrement vitrée exposée de toute part à l'air extérieur, le rayonnement réciproque ne produisant aucun effet, les vitres ne sont échauffées que par l'air, et l'on a, en négligeant l'effet du sol :

$$M = (T - \theta)k', \qquad M = Q(\theta - T');$$

d'où :
$$\theta = \frac{k'T + QT'}{Q + k'}, \qquad M = \frac{Qk'(T - T')}{Q + k'};$$

formules desquelles on tire, pour $T' = 6°$, $T = 15°$ et pour les hauteurs de vitres :

	1m	2m	3m	4m	5m
M =	14,85	13,86	13,41	13,23	13,05
M =	1,65	1,54	1,49	1,47	1,45

Ces dernières valeurs de M sont pour une différence $T - T' = 1°$.

Les deux cas extrêmes que nous venons d'examiner pour les vitres, de même que les cas analogues pour les murailles (709), ne se réalisent jamais entièrement dans la pratique. Dans le premier cas, les murs en face des vitres ont toujours une température inférieure à celle de l'air; dans le second, il y a toujours une partie de l'enceinte qui n'est pas vitrée, et quand le chauffage a lieu en partie par le rayonnement des surfaces échauffées, les rayons qui arrivent directement sur les vitres augmentent la quantité de chaleur qu'elles transmettent. Mais la chaleur transmise est comprise entre les limites assignées à ces cas extrêmes.

711. La quantité de chaleur perdue par le sol, en général très petite, peut être négligée dans l'établissement des appareils de chauffage. Dans nos climats, la température du sol étant à peu près constante à 8 mètres de profondeur, et égale à la température moyenne annuelle de 10 à 11°, il en résulte que la température du sol des édifices doit être voisine de cette dernière, qui diffère peu de celle intérieure habituelle de 15°.

712. Quant à l'**influence de la partie supérieure des pièces**, les édifices publics et les maisons particulières étant toujours recouverts d'une toiture et d'un plancher épais de grenier, il en résulte qu'on peut négliger la perte de chaleur par la partie supérieure des édifices.

713. Transmission de la chaleur à travers les enveloppes cylindriques. Ce cas est celui, par exemple, d'un tuyau métallique parcouru par de la vapeur et enveloppé d'une matière conduisant mal la chaleur. On a :

$$M = \frac{2\pi R'C(k+k')(T-T')}{C+(k+k')R'N}.$$

M quantité de chaleur transmise par unité de longueur du tuyau et par heure;
$N = e(\log R' - \log R)$;
$e = 2{,}3026$ nombre par lequel il faut multiplier le logarithme d'un nombre pour avoir son logarithme népérien (*Int.* 409);
R et R' rayons extérieurs du tuyau de l'enveloppe;
T et T' températures intérieure et extérieure;
C coefficient de conductibilité de l'enveloppe (4°);
k et k' coefficients dus au rayonnement et au contact de l'air (705 et 706); si la matière enveloppante est couverte de toile, $k = 3{,}65$, et k' se déduit de la formule donnée au n° 706 pour les cylindres horizontaux.

714. Cheminées ordinaires. La quantité de chaleur rayonnée dans l'appartement par un foyer ordinaire de cheminée est à peu près le quart de la chaleur totale rayonnée par le combustible; ainsi, pour le bois, elle est seulement les 0,06 ou 0,07 de la chaleur totale développée par sa combustion (508, 539).

Les combustibles les plus convenables pour ce mode de chauffage sont la houille et le coke, dont les pouvoirs rayonnants sont très grands (521, 535). Les cheminées ouvertes n'utilisent cependant qu'environ les 0,13 de la chaleur totale développée par ces combustibles.

On peut admettre que dans les cheminées ordinaires 1 kilog. de bois exige au moins l'appel de 100 mètres cubes d'air, et 60 mètres cubes dans celles qui sont mieux construites (536). Pour une cheminée ordi-

naire d'appartement, une section de 3 à 4 décimètres carrés est presque toujours suffisante pour le tuyau de fumée. Le diamètre varie de $0^m,20$ à $0^m,25$; rarement il convient de dépasser cette limite, si ce n'est pour les appartements destinés à recevoir un grand nombre de personnes; dans ce cas, afin de faciliter la ventilation, on porte la section à 25 ou 27 décimètres carrés, $0^m,80$ sur $0^m,32$ environ.

Rumford a rétréci à $0^m,12$ ou $0^m,15$ de large l'orifice de communication du foyer avec le tuyau, de manière à réduire à $0^{mq},04$ ou $0^{mq},06$ la surface de cet orifice; il diminua de près de moitié la profondeur du foyer, et le termina latéralement par des murs inclinés à 45°. L'Homond a ajouté le tablier mobile en tôle. Les cheminées à la l'Homond sont celles ordinaires de nos appartements. La distance du tablier au contre-cœur n'est guère que de 0,15 et à une hauteur de $0^m,30$; ce contre-cœur porte des briques qui ne laissent plus à l'ouverture que $0^m,05$ de largeur. Généralement, les cheminées ont de 1 mètre à $1^m,50$ de large; la hauteur du dessus de la tablette varie entre $0^m,98$ et $1^m,30$; la largeur de la tablette, de $0^m,27$ à $0^m,43$; la profondeur, de $0^m,45$ à $0^m,80$.

A la même époque, on munit la cheminée d'une prise d'air, connue sous le nom de *ventouse*, qui prenait l'air à l'extérieur et l'amenait en arrière du foyer. Aujourd'hui, on emploie peu cette disposition qui a l'inconvénient d'amener de l'air froid dans les appartements; ou plus exactement on l'a modifiée en obligeant l'air à revenir en avant du foyer, et l'on interrompt à volonté par une plaque mobile cette prise d'air.

Une modification importante, apportée depuis longtemps aux cheminées, consiste à les munir d'appareils métalliques dans lesquels l'air appelé du dehors s'échauffe avant son introduction dans la pièce à chauffer. Les appareils de réchauffement ont pris de plus en plus d'importance et ont fourni la cheminée Fondet, l'appareil Cordier, les cheminées Gaillard et Haillot, les cheminées Laury, Doulton, C. Joly, Vazon, etc. Avec tous ces appareils, on utilise une plus grande partie de la chaleur fournie par le combustible. De plus, toutes ces dispositions permettent d'utiliser le coke et la houille, en les brûlant dans des grilles installées dans les cheminées d'appartement.

Les proportions de charbon nécessaires pour maintenir une même salle à la même température pendant le même temps, sont 100 pour les cheminées ordinaires, 13 pour les poêles métalliques, et de 13 à 16 pour les appareils analogues aux poêles, mais à foyer ouvert.

Dans le choix des différents modes de chauffage il faut avoir égard non seulement à la chaleur utilisée, mais aussi à la ventilation produite.

Pour les règlements et l'installation des cheminées, voir la 5e partie.

Cheminées d'usines (voir p. 731).

715. Poêles (705). Lorsqu'un tuyau dans lequel circule de la fumée chauffe directement l'air extérieur, on peut admettre que la quantité de chaleur qui passe à travers ses parois est proportionnelle à la différence des températures intérieure et extérieure, et, des expériences de

Péclet sur les cheminées en tôle, en fonte et en terre il résulte qu'un mètre carré de surface laisse passer en une heure, pour une différence de température de un degré, 3,93 unités de chaleur pour la tôle, 9,9 unités pour la fonte, et 3,85 unités pour la terre cuite de $0^m,01$ d'épaisseur.

D'après cela, supposant que, dans un poêle, la fumée soit abandonnée à 200°, on peut même, avec de bonnes dispositions, l'amener jusqu'à 100° avant de la laisser s'échapper au dehors, sa température aux environs du foyer étant au moins de 800°, sa température moyenne est de 500° pendant la chauffe, et l'excès de température varie de 400° à 500°; d'où il résulte que, dans ce cas, chaque mètre carré de surface de chauffe laisse passer en une heure, pour un excès moyen de 450°, 1768,5 unités de chaleur pour la tôle, 4455 pour la fonte, et 1732,5 pour la terre cuite de $0^m,01$ d'épaisseur. Cette énorme différence des quantités de chaleur qui passent à travers la tôle et la fonte n'existe pas dans le chauffage par l'eau ou par la vapeur.

Les résultats précédents peuvent servir à calculer la surface de chauffe d'un poêle ou d'un calorifère, les tuyaux parcourus par la fumée ayant la section minimum de la cheminée (544), et le combustible produisant un effet utile égal aux 0,80 de sa puissance calorifique. Dans la pratique, on compte sur 1 mètre carré de *surface de chauffe* en tôle ou en fonte, quoique pour cette dernière elle puisse être beaucoup moindre, par 100 mètres cubes de capacité de salle à chauffer. D'après Triest, la surface extérieure d'un poêle métallique doit être de 1/7 à 1/9 de la surface extérieure de la pièce à chauffer. L'effet utile des poêles varie de 70 à 90 p. 100 (719).

Le diamètre des *tuyaux des poêles* peut se calculer comme celui des cheminées; mais il vaut mieux s'en tenir aux dimensions $0^m,10$ à $0^m,20$.

Les tuyaux des poêles se font en terre cuite ou en tôle; ils sont généralement logés dans l'épaisseur des murs, et constitués par des *wagons* ou par des *briques cintrées* de formes particulières. Pour les tuyaux simplement adossés aux murs, on fait usage de poteries nommées *boisseaux;* la forme circulaire est la meilleure pour le tirage. Les conduits en brique, quand ils sont isolés et que leur hauteur dépasse $4^m,50$, doivent avoir $0^m,22$ d'épaisseur sur deux de leurs parois, et $0^m,11$ sur les deux autres.

On donne un degré suffisant d'humidité à l'air en plaçant un vase plein d'eau sur le poêle ou dans les conduits d'air chaud. La quantité d'eau est de 1 à 1,5 litre par jour pour une salle de 75 à 80^{m3}.

M. Gurney a eu l'idée de recouvrir la surface extérieure des poêles en fonte d'un grand nombre de nervures verticales. La surface en contact avec l'air étant considérable, le poêle ne rougit plus comme lorsqu'il est lisse, et l'on peut estimer que si l'on quadruple ainsi la surface, on double à peu près la chaleur transmise par le poêle.

716. Chauffage méthodique (voir p. 766). La fumée et l'air échauffé peuvent, dans les calorifères, suivre une marche différente. Tantôt la fumée parcourt les tuyaux et l'air environnant s'échauffe par contact,

tantôt la fumée circule autour du tuyau et échauffe l'air qui passe à l'intérieur.

Les deux circulations d'air et de fumée peuvent marcher dans le même sens ou en sens contraire. Supposons qu'ils marchent dans le même sens : au commencement du trajet la fumée est très chaude et l'air très froid; l'échange de calorique sera très rapide, mais lorsque la fumée se sera refroidie à 100°, elle ne cédera plus de calorique. Au contraire, lorsque les deux courants marchent en sens contraire, l'air, entrant froid, rencontre d'abord la fumée la moins chaude et lui emprunte de la chaleur, puis il rencontre graduellement de la fumée de plus en plus chaude et s'échauffe de plus en plus. La fumée aura donc été mieux utilisée que dans le premier cas; c'est ce qui constitue le chauffage méthodique.

717. Calorifères à air chaud placés dans les pièces qu'ils doivent chauffer et ventiler. Ces calorifères, employés pour les écoles et pour les petites salles d'hôpitaux, doivent, comme tous les calorifères, puiser à l'extérieur l'air à chauffer. La disposition la plus simple consiste en une colonne verticale rectangulaire ou cylindrique de $1^m,50$ à 2 mètres de hauteur, renfermant le foyer, et surmontée d'un tuyau qui s'élève d'abord verticalement, pour se recourber ensuite horizontalement et gagner la cheminée en traversant une partie plus ou moins étendue de la salle. La colonne contenant le foyer est environnée d'une enveloppe en tôle ou en maçonnerie légère, et l'intervalle de la colonne et de l'enveloppe communique par le bas avec un canal qui amène l'air du dehors, et par le haut avec l'air de la pièce. Le tirage ayant lieu dans la partie verticale, la fumée peut être peu à peu complètement refroidie dans le tuyau horizontal; d'où il résulte qu'à l'économie de frais d'établissement de l'appareil se joint celle de combustible.

La *surface de la grille* peut se fixer d'après la quantité maximum de combustible à brûler par heure (742), cette quantité étant déterminée d'après le nombre d'unités de chaleur qui passe dans le même temps à travers la muraille et les vitres dans les conditions les plus défavorables (709 et 710); mais il convient toujours d'employer de très grandes grilles, de manière à avoir deux feux dormants.

D'après la hauteur de la partie verticale où se produit le tirage, on peut calculer approximativement la section du tuyau, en employant la méthode générale (544). Mais cette section doit être déterminée d'après l'étendue de la surface de refroidissement; ce qui, à moins que le tuyau n'ait une très grande longueur, conduit à une section plus grande que celle qu'exigerait le tirage. D'après Péclet, on ne peut pas compter que le foyer soit à une température supérieure à 600 ou 700°, à cause de la chaleur rayonnée sur l'enceinte constamment refroidie par le courant d'air traversant l'espace qui la sépare de l'enveloppe extérieure. Dans la pratique, on obtient des résultats convenables en admettant que l'air brûlé s'échappe du foyer à une température voisine de 500°, qu'il se refroidit complètement dans son parcours, que la température de la pièce est de 15°, et que la quantité de chaleur émise est la même

que si le tuyau avait dans toute son étendue la température moyenne de 250°. Partant de là, supposant que le rayon du tuyau soit égal à $0^{m},075$, la formule (7) du n° 707 donne pour la chaleur transmise en une heure par un mètre carré de surface, en observant que $m = 124,72 \times 3,36 = 419,06$, $a = 1,0077$, $\theta = 15°$, $t = 250 - 15 = 235°$,

$$m' = 0,552 \left(2,058 + \frac{0,0382}{0,075}\right) = 1,417,$$

$$\mathbf{M} = \mathrm{R} + \mathrm{A} = 419,06 \times 1,0077^{15} (1,0077^{235} - 1) + 1,417 \times 235^{1,233}$$
$$= 2382 + 1188 = 3570.$$

Supposant que la fumée à la sortie de la colonne renferme encore à peu près les 5/12 de la chaleur produite, soit 3335 unités par kilog. d'un combustible tel que la houille, dont la puissance calorifique est 8004 (539) par kilog. de houille, il faudra $3335 : 3570 = 0^{mq},93$ de surface de tuyau. Une variation, même considérable, dans l'étendue de la surface de chauffe n'a pas une influence très grande sur l'effet utile, attendu que la variation se porte toujours sur l'extrémité du tuyau, laquelle transmet le moins de chaleur. Dans la pratique, on prend $1^{mq},50$ à 2 mètres carrés de surface de chauffe par kilog. de houille à brûler par heure, non compris les surfaces du foyer.

La figure 156 représente la coupe d'un poêle calorifère à alimentation continue, établie d'après ce système par M. Martin, ingénieur à Besançon.

Fig. 156.

F′ réservoir de coke d'une capacité de $0^{mc},25$; on le remplit par le haut après avoir enlevé le chapeau en tôle qui recouvre tout l'appareil; dans ce chapeau on peut placer un vase contenant de l'eau. Une charge du réservoir F′ faite le matin peut alimenter le foyer pendant 8 ou 12 heures.

F foyer; on y allume le feu par la porte P avant de charger le réservoir F′.

C cendrier; en le tirant plus ou moins à l'aide de la poignée P′ on augmente ou modère l'arrivée de l'air de la salle sous la grille G.

ll′ orifice annulaire par lequel les produits de la combustion quittent le foyer pour se rendre dans l'espace OO′ compris entre le tronc de cône F′ et une première enveloppe BB. Cet espace est divisé au milieu de sa hauteur par une cloison horizontale qui porte en O, du côté opposé au tuyau de départ T de la fumée, une ouverture qui oblige la fumée de circuler au contact de la paroi de chauffe BB avant d'arriver au tuyau T. Le tuyau T est mun

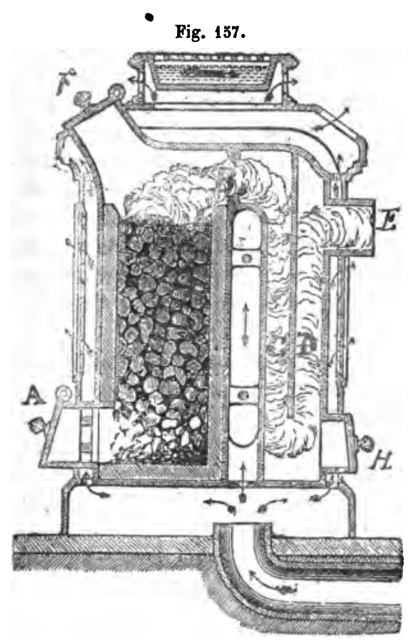
d'une valve régulatrice, et il s'élève verticalement à une hauteur de 1 ou 2 mètres, où il se raccorde avec le tuyau presque horizontal qui traverse la salle.

E canal d'arrivée de l'air puisé à l'extérieur; il est muni d'une valve régulatrice R. Cet air s'élève et s'échauffe dans un espace compris entre l'enveloppe extérieure AA et celle de chauffe BB, et pénètre dans la salle par des ouvertures latérales S garnies de toiles métalliques.

Les parois en contact avec le foyer sont en fonte, et tout le reste est en tôle, sauf quelques petites parties qui sont en laiton, à titre d'ornementation.

Dans le système Musgrave (*fig.* 157) le combustible est enfourné dans une cuve rectangulaire en fonte doublée de terre réfractaire. Il n'y a pas de grille; l'air pour la combustion entre par la porte A, qu'on laisse plus ou moins entr'ouverte en la faisant glisser sur sa charnière. C'est aussi par cette porte que l'on retire les cendres. Les gaz traversent la colonne de combustible. Au sommet, ils rencontrent une nappe d'air chaud sortant de deux conduits (non indiqués sur la *fig.* 157) ménagés dans le devant de la cuve. Cet air, attiré, ainsi que les produits de la combustion, vers l'ouverture B, se mélange aux gaz, les oxyde et en achève la combustion. Avant de parvenir à la buse d'évacuation E, les gaz ont encore à parcourir les conduits plats C et D. La nappe d'air qui traverse le sommet de la cuve forme aussi le tampon de fermeture de la cuve, car la porte de chargement F n'est munie d'aucune garniture étanche, et peut être laissée ouverte sans danger. La porte H, qui reste fermée, permet le ramonage des conduits C et D. L'air à chauffer entre par le socle du poêle et s'élève à travers l'espace qui reste, tout autour du poêle, entre la cuve et les conduits en fonte d'une part, et l'enveloppe extérieure d'autre part. L'air chaud se répand dans la chambre par les ouvertures des parois et du faîte de l'enveloppe. Un saturateur, placé au sommet, fournit à l'air chaud l'humidité nécessaire. Les surfaces de chauffe de l'air sont considérablement augmentées par un grand nombre de nervures venues de fonte avec la cuve et les conduits de fumée. Ces nervures facilitent la transmission de la chaleur à l'air, et diminuent la température des surfaces métalliques.

Fig. 157.



718. Calorifères non placés dans les pièces qu'ils doivent chauffer et ventiler. Le maximum de combustible à brûler se détermine en supposant que son effet utile soit les 0,50 ou 0,55 de sa puissance calori-

fique (539); cet effet utile varie en réalité de 60 à 80 p. 100. La grille, pour une même quantité de combustible brûlée, a la même surface que pour les chaudières à vapeur (742), mais il vaut mieux augmenter cette surface et la porter jusqu'à 1 décimètre carré pour $0^k,50$ de houille que de la diminuer. La section de la cheminée et des canaux de circulation se calcule comme pour les chaudières à vapeur (542, 543), en supposant égale à 200° la température de la fumée dans la cheminée. Selon que la hauteur de la cheminée est de 10, 20 ou 30 mètres, le poids de houille brûlée par heure peut être de $1^k,87$, $2^k,58$ ou $3^k,02$ par décimètre carré de section.

Les *conduits de fumée* sont en briques, en terre cuite ou en tôle. Dans ces deux derniers cas, leur diamètre ne doit pas être inférieur à $0^m,21$. Pour une section de $0^{m2},07$, la longueur de ces conduites est de 31 à 38 mètres; ils sont inclinés d'au moins $0^m,02$ par mètre courant. La hauteur de la cheminée doit être 1/3 environ de la longueur des conduits. La cloche du foyer doit avoir de $0^m,80$ à $0^m,90$ sur $0^m,50$ à $0^m,60$.

La surface de chauffe réelle est de 2 mètres carrés par kilog. de houille ou 2 kilog. de bois à brûler par heure. La surface de chauffe varie de 15^{m2} (avec des tuyaux verticaux) à 20^{m2} (avec tuyaux horizontaux) pour 1000 mètres cubes d'air à chauffer. La surface de grille égale 1/150 de la surface de chauffe.

La quantité d'eau à donner par jour pour entretenir l'humidité est de 1,5 à 2 litres pour une salle de 100 mètres cubes.

Les tuyaux qui conduisent l'air chaud dans les diverses pièces à chauffer doivent, autant que possible, partir tous du réservoir d'air chaud, afin qu'ils ne se gênent pas mutuellement. Deux tuyaux branchés l'un sur l'autre ne doivent pas se servir d'obtureur; aussi faut-il, dans ce cas, faire usage d'une *culotte*. La vitesse de l'air dans les tuyaux ne doit pas être supérieure à $0^m,50$, les coudes et les étranglements des clefs compensés.

Pour les *conduits d'air chaud* la section varie de $0^{m2},04$ à $0^{m2},08$; la section de $0^{m2},05$ est adoptée pour les locaux ordinaires.

Pour les *conduits d'air froid* la section est 1/4 ou 1/5 de celle d'air chaud, quand c'est l'air de la pièce à chauffer qui entre dans le calorifère; quand c'est l'air extérieur amené par des prises spéciales, la section varie des 3/4 à l'égalité de celle d'air chaud.

Les *conduits d'évacuation de l'air* doivent avoir une section de 1/3 à 1/4 de celle des conduits d'air chaud.

Les bouches doivent être larges et maillées avec du fil de fer ou de cuivre très fin, à grandes mailles de $0^m,005$ au moins de côté. Les bouches à coulisse sont plus commodes pour régler l'ouverture que celles à charnières.

Sans un moyen d'évacuation de l'air de la salle, l'air chaud ne peut pas s'y introduire. L'appel peut se faire par la cheminée, quand il y en a une, ou par une cage d'escalier contigu, à l'aide d'une bouche grillagée de communication. Dans les salles à manger ou les antichambres, on peut placer au plafond ou près du plafond une bouche grillagée qui

communique, par un tuyau de $0^m,15$ à $0^m,16$ de diamètre, avec un tuyau de tôle montant de 2 mètres dans la cheminée de la cuisine ou dans toute autre cheminée constamment chauffée.

Quand on chauffe plusieurs étages avec un seul calorifère, les étages supérieurs absorbent tout l'air sans rien laisser au rez-de-chaussée; on remédie à cet inconvénient à l'aide de coulisses ou en divisant par des cloisons le réservoir d'air chaud en autant de parties qu'il y a d'étages. Il convient, quand cela est possible, que le tuyau qui conduit l'air à chaque étage circule sous le plafond de l'étage immédiatement inférieur; des bouches convenablement distribuées sur sa longueur amènent l'air dans la pièce en traversant le plancher.

Pour pouvoir chauffer un rez-de-chaussée le calorifère doit être établi dans une cave en contre-bas; sans cela l'air chaud se distribue mal dans la pièce; il n'y va même pas si l'on chauffe en même temps des étages supérieurs.

Lorsqu'on fait arriver l'air chaud dans une pièce telle qu'un amphithéâtre par un grand nombre d'orifices placés sous les bancs, la section de ces orifices doit être calculée de manière que la vitesse de l'air ne dépasse pas $0^m,20$ par seconde.

Il n'y a guère que dans les hôpitaux qu'il soit nécessaire de maintenir une température constante jour et nuit. On y parvient par une combustion continue dans les foyers, ou par des réservoirs d'eau qui accumulent de la chaleur développée le jour pour la dégager lentement la nuit. Mais, à moins que les murailles n'aient qu'une bien faible épaisseur, la chaleur qu'elles renferment est presque toujours suffisante pour rendre peu sensible la diminution de température pendant la nuit.

En général, quand les murailles ont une certaine épaisseur, les chauffages de nuit sont inutiles, et un chauffage actif d'un petit nombre d'heures le matin peut réparer en grande partie la perte de régime qui a lieu pendant la nuit. Quand les murailles n'ont qu'une faible épaisseur, comme dans certaines usines, elles se refroidissent beaucoup pendant la nuit; mais on parvient encore facilement à les échauffer en allumant les foyers nn certain nombre d'heures avant l'arrivée des ouvriers.

Lorsque les pièces ne sont employées que certains jours et à certaines heures, pour économiser le combustible, on ne maintient pas les murailles dans un état constant de température, on ne rétablit même pas l'équilibre au moment de les utiliser; on se contente, par un chauffage très vif de quelques heures, d'échauffer partiellement les murailles, et de compenser leur faible température par un plus grand échauffement de l'air pendant l'occupation des pièces (709).

Les différentes parties des appareils de chauffage se construisent pour les jours les plus froids de l'hiver, et de manière que le matin, en un petit nombre d'heures, ils puissent amener l'air et les murs de la salle à la température qu'ils doivent avoir pendant le jour. Il est économique de disposer les appareils de manière que, pendant ce chauffage préliminaire, on puisse interrompre la ventilation; ainsi le calorifère étant à

air chaud, il convient de pouvoir faire aller successivement l'air de la salle au calorifère et du calorifère à la salle.

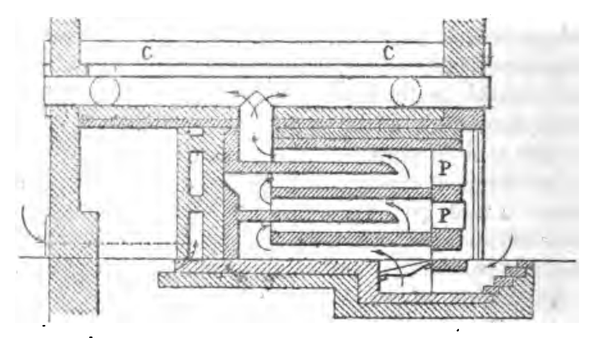
Parmi les calorifères en fonte à chauffage méthodique (716), citons les systèmes Gaillard-Haillot, du Roselle, Giraudeau, Jalibert, d'Hamelincourt, tous à circulation verticale. Dans le système Nicora, en tôle et briques réfractaires, la circulation est verticale, mais elle marche alternativement de haut en bas et de bas en haut, les tuyaux de fumée communiquant entre eux alternativement par le haut et par le bas, et formant ainsi serpentin; il se construit des types de ce système pouvant chauffer depuis 200 jusqu'à 50000 mètres cubes.

Parmi les calorifères à circulation de fumée horizontale, se placent les systèmes Piet-Bellan, Grouvelle, Milhomme, ce dernier pouvant chauffer 10000 mètres cubes avec une consommation journalière de 220 à 250 kilog. de houille, avec une surface de chauffe de 45^{m2}. Dans le calorifère Geneste-Herscher, la fumée produite dans une cloche est ramenée dans une enveloppe creuse demi-cylindrique, qui entoure le foyer.

Les calorifères en fonte ont l'avantage d'être très simples à construire et à installer. Pour de faibles échauffements, les calorifères en briques sont un peu plus coûteux que ceux en fonte et exigent des appareils plus encombrants; quand il s'agit de chauffages importants, l'avantage se trouve renversé; les calorifères en briques sont plus hygiéniques.

Foyer Michel Perret. Dans ce foyer, le combustible est étalé en couches

Fig. 158.



minces sur des voûtes en briques réfractaires étagées comme le montre la figure 158. La manœuvre consiste à faire descendre le combustible d'un étage à l'autre à l'aide d'un râble et à charger l'étage supérieur.

La grille inclinée sert à mettre en feu l'appareil en portant au rouge toutes les parois intérieures avant de charger le combustible sur l'étage supérieur. Les gaz passent dans les tuyaux autour desquels circule l'air à échauffer amené par le canal. Cet air peut atteindre ainsi 300°.

La manœuvre se fait par les portes P, P à des intervalles de temps de 6, 12 ou 24 heures. Le feu est continu. La consommation de combustible par mètre carré de l'étage supérieur et par heure est de 2 kilog. pour des intervalles de chargement de 24 heures, de 4 kilog. pour les intervalles de 12 heures et de 8 kilog. pour des intervalles de 6 heures.

La combustion très complète se fait avec un faible tirage. On peut au moyen de ce foyer utiliser les plus mauvais combustibles : les fraisils des forges, les résidus de lavage des houilles, les suies de locomotives, etc., et même les matières ne contenant que 25 p. 100 de combustible.

719. Rendements calorifiques des poêles, d'après le général Morin :

En faïence, chauffé au bois	0,869
En tôle, chauffé à la houille	0,900
En fonte, système Gurney	0,901
Id. *id* René Duvoir	0,856
Id. à flamme renversée	0,940
Id. *id.* avec ventilation	0,845
En terre réfractaire, système Muller	0,933

720. Poêles mobiles. Depuis quelques années, on a imaginé pour le chauffage des appartements des poêles à combustion lente, transportables très facilement d'une pièce dans une autre et procurant une grande économie de combustible sur les autres systèmes. Les poêles mobiles, très en vogue, ont été très vivement attaqués par les savants, à cause de leurs propriétés pernicieuses, et l'Académie de médecine en a demandé la proscription.

L'un des plus célèbres de ces poêles, le *poêle Choubersky*, consiste en un cylindre en tôle renfermant, dans sa partie inférieure, un pot en fonte qui est le foyer, et dans les deux tiers supérieurs de sa hauteur, un second cylindre intérieur en tôle qui est le réservoir à combustible. Ce dernier se termine à 2 ou 3 centimètres au-dessus de l'arête supérieure du foyer ; il reste donc entre le réservoir de combustible et le foyer une rainure circulaire par laquelle les gaz, produits de la combustion, se répandent dans l'espace annulaire compris entre les deux cylindres. Là, une partie de ces gaz s'échappe immédiatement par la buse ; une autre reste plus ou moins stagnante, mais finit par être attirée à son tour dans la buse par le tirage. L'air nécessaire à la combustion entre par le cendrier, qu'un arrêt force à rester toujours largement entre-bâillé. On modère le tirage, pour mettre le poêle en petite marche, au moyen d'un registre sur la buse. D'après la *Semaine des Constructeurs* (1889), les défauts de ce poêle sont la formation d'une grande quantité d'oxyde de carbone, l'impossibilité pour ce gaz d'être complètement évacué dans la cheminée et son refoulement dans la chambre quand l'appareil est en petite marche, le manque de sensibilité pour régler l'intensité du chauffage, le desséchement de l'air de la chambre, etc. Les perfectionnements apportés à ce poêle n'ont produit que des améliorations partielles.

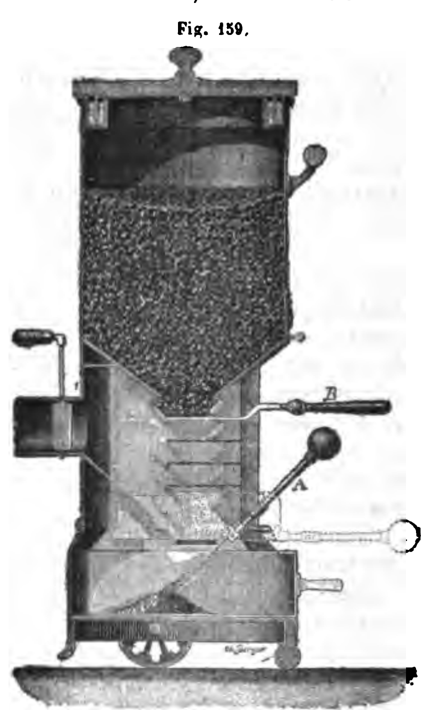
Tous les poêles à rayonnement ont un vice inséparable de leur principe : la haute température de leur surface extérieure. La grande chaleur émise par leur enveloppe rend inaccessible toute la partie de la chambre voisine du poêle, et détériore les meubles placés à proximité. En même temps, le chauffage et la circulation de l'air s'établissent autour de la surface du poêle, absolument comme cela a lieu dans l'intérieur d'un appareil à chauffage d'air ; seulement, ce chauffage est fait néces-

sairement ici dans des conditions plus mauvaises, parce que l'air est en contact direct avec une surface métallique à haute température, qui le dessèche et le brûle. Dans les poêles à circulation, il est possible de prendre de bonnes dispositions pour éviter de surchauffer l'air, tandis qu'on ne le peut dans les poêles à rayonnement.

Parmi les poêles à circulation d'air, le système Besson est un des plus répandus; le poêle *russe* est un de ceux qui présentent les dispositions les meilleures.

Le *poêle Cadé* forme à lui seul un groupe à part (*fig.* 159). Le foyer, haut et très étroit, est renfermé entre deux rangées verticales de barreaux de terre réfractaire ajustés dans un pot en fonte, ouvert sur le devant. Des deux côtés, deux grandes baies, pratiquées dans la fonte et fermées par des barreaux, laissent voir le feu. La réserve de combustible est emmagasinée dans la partie supérieure de l'enveloppe en tôle; ce réservoir se termine en trémie par le bas. On débarrasse le feu des cendres en faisant basculer la plaque du fond A; pendant cette opération, on retient la masse en introduisant la palette à poignée B entre deux des barreaux. Il n'y a que de faibles traces d'oxyde de carbone parmi les produits de la combustion. Mais le défaut de l'appareil, c'est que les produits de la combustion sont directement évacués dans la cheminée au sortir du foyer, sans le moindre bénéfice pour le chauffage, excepté celui du rayonnement du foyer même. La partie supérieure de l'appareil reste constamment froide.

Fig. 159.



A la suite de la discussion soulevée en 1889 à propos des dangers que peuvent présenter les poêles mobiles, le Conseil d'hygiène publique et de salubrité du département de la Seine a publié les instructions suivantes relatives au mode de chauffage des habitations :

1° Les combustibles destinés au chauffage et à la cuisson des aliments ne doivent être brûlés que dans les cheminées, poêles et fourneaux qui ont une communication directe avec l'air extérieur, même lorsque le combustible ne donne pas de fumée. Le coke, la braise et les diverses sortes de charbon qui se trouvent dans ce dernier cas, sont considérés à tort, par beaucoup de personnes, comme pouvant être brûlés impunément à découvert dans une chambre abritée. C'est là un des préjugés les plus fâcheux; il donne lieu aux accidents les plus graves, quelquefois même il devient

cause de mort. Aussi doit-on proscrire l'usage des braseros, des poêles et des calorifères portatifs de tout genre qui n'ont pas de tuyaux d'échappement au dehors. Les gaz qui sont produits pendant la combustion par ces moyens de chauffage, et qui se répandent dans l'appartement, sont beaucoup plus nuisibles que la fumée de bois.

2° On ne saurait trop s'élever contre la pratique de fermer complètement la clef d'un poêle ou la trappe intérieure d'une cheminée qui contient encore de la braise allumée. C'est là une des causes d'asphyxie les plus communes. On conserve, il est vrai, la chaleur dans la chambre; mais c'est aux dépens de la santé et quelquefois de la vie.

3° Il y a lieu de proscrire formellement l'emploi des appareils et poêles économiques à faible tirage dits « poêles mobiles » dans les chambres à coucher et dans les pièces adjacentes.

4° L'emploi de ces appareils est dangereux dans toutes les pièces dans lesquelles des personnes se tiennent d'une façon permanente et dont la ventilation n'est pas largement assurée par des orifices constamment et directement ouverts à l'air libre.

5° Dans tous les cas, le tirage doit être convenablement garanti par des tuyaux ou cheminées présentant une section et une hauteur suffisantes, complètement étanches, ne présentant aucune fissure ou communication avec les appartements contigus et débouchant au-dessus des fenêtres voisines. Il est indispensable, à cet effet, avant de faire fonctionner le poêle mobile, de vérifier l'isolement absolu des tuyaux ou cheminées qui le desservent.

6° Il ne suffit pas que les poêles portatifs soient munis d'un bout de tuyau destiné à être simplement engagé sous la cheminée de la pièce à chauffer. Il faut que cette cheminée ait un tirage convenable.

7° Il importe, pour l'emploi de semblables appareils, de vérifier préalablement l'état du tirage, par exemple à l'aide de papier enflammé. Si l'ouverture momentanée d'une communication avec l'extérieur ne lui donne pas l'activité nécessaire, on fera directement un peu de feu dans la cheminée avant d'y adapter le poêle, ou, au moins, avant d'abandonner ce poêle à lui-même. Il sera bon, dans le même cas, de tenir le poêle un certain temps en grande marche (avec la plus grande ouverture du régulateur).

8° On prendra scrupuleusement ces précautions chaque fois que l'on déplacera un poêle mobile.

9° On se tiendra en garde, principalement dans le cas où le poêle est en petite marche, contre les perturbations atmosphériques qui pourraient venir paralyser le tirage et même déterminer un refoulement des gaz à l'intérieur de la pièce. Il est utile, à cet effet, que les cheminées ou tuyaux qui desservent le poêle soient munis d'appareils sensibles indiquant que le tirage s'effectue dans le sens normal.

10° Les orifices de chargement doivent être clos d'une façon hermétique, et il est nécessaire de ventiler largement le local chaque fois qu'il vient d'être procédé à un chargement de combustible.

721. Chauffage de l'air par la vapeur. D'après Tregold, les quantités de vapeur condensée en une heure par mètre carré de surface d'un tuyau exposé à l'air libre à 15° sont pour les tuyaux (596) :

de fer-blanc	1^{kg},07
de verre	1 ,76
de tôle neuve	1 ,80
de tôle rouillée	2 ,10

D'après Clément, la température de l'air étant 25°, un mètre carré de surface condense en une heure les poids de vapeur consignés dans le tableau suivant. La dernière colonne donne les poids de vapeur qui seraient condensés si la température de l'air était de 15°.

Dans les grands chauffages à vapeur, on peut compter sur 1^{kg},80 de vapeur condensée en une heure par mètre carré de surface pour la fonte, et sur 1^{kg},75 pour le cuivre (707).

DÉSIGNATION DES SURFACES	CONDENSATION, la température de l'air étant de	
	25°	15°
	kilog.	kilog.
Tuyau horizontal en fonte nue	1,60	1,81
Id. en fonte noircie	1,50	1,70
Id. en cuivre nu	1,30	1,47
Id. en cuivre noirci	1,50	1,70
Tuyau vertical en cuivre noirci	1,75	1,98

D'après Grouvelle, 1 mètre carré de surface de fonte, chauffé intérieurement par la vapeur, et par conséquent les 990 unités de chaleur transmise par 1^{kg},80 de vapeur condensée suffisent pour chauffer et entretenir à 15° une salle de proportions de murs et de fenêtres ordinaires, telle que bibliothèque, bureau, etc., de 66 à 70 mètres cubes de capacité, ou un atelier de 90 à 100 mètres cubes. Si l'atelier a besoin d'une haute température, on prend un mètre de surface de chauffe par 70 mètres de capacité. Pour la Bourse de Paris on a compté sur 67 mètres, qui chauffent convenablement.

Les tuyaux de condensation de la vapeur (en tôle ou fonte galvanisée) à basse pression ont une longueur de 2 à 5 mètres et un diamètre de 0^{m},07 à 0^{m},20; 0^{m},11 est le diamètre convenable lorsque le générateur correspond à la force de 12 chevaux. Le tuyau qui amène la vapeur de la chaudière est beaucoup plus petit; en Angleterre, on le fait en fer creux et on lui donne de 3 à 5 centimètres de diamètre; en France, on le fait généralement en cuivre. Lorsque, par suite de circonstances indépendantes du chauffage, la pression dans le générateur est élevée de 2 atmosphères et au-dessus, d'après Grouvelle, le diamètre intérieur du tuyau de condensation doit être égal à un minimum de 0^{m},035 augmenté de 0^{m},0015 par force de cheval du générateur employé. Ainsi, pour une force de 10 chevaux, c'est-à-dire pour 200 à 250 kilog. environ de vapeur à l'heure, le diamètre est de 0^{m},05.

MM. Sée, pour obtenir, sous un faible volume, de grandes surfaces de chauffe, garnissent les tuyaux de condensation d'ailettes ou d'anneaux.

Connaissant le volume en mètres cubes d'air froid à chauffer dans un certain temps, en le multipliant par le poids d'un mètre cube (464 et 483), on a le poids total d'air à chauffer; ce poids, multiplié par la capacité calorifique de l'air (488) et par la différence des températures de l'air chaud et de l'air froid, donne la quantité de chaleur à fournir (701, 2e problème). Cette quantité divisée par 550, chaleur latente de vaporisation (490), donne la quantité de vapeur condensée. On détermine la quantité de charbon à brûler (539), et par suite les dimensions de la grille (742), des conduits de fumée et de la cheminée (542, 543).

Avec le chauffage par la vapeur, pour des ateliers de 8 mètres de largeur sur 3 mètres de hauteur, et dont la surface des vitres est le 1/6 de la surface totale, un tuyau en fonte de 0^{m},40 de circonférence, parcourant

seulement une fois la longueur de l'atelier, suffit pour y maintenir une température constante de 15° pendant les temps les plus froids. Cela fait une surface de chauffe de $0^{mq},40$, qui peut transmettre 396 unités de chaleur en une heure, par mètre courant d'atelier.

D'après Péclet, pour une différence maximum de 20° entre les températures intérieure et extérieure, il faudrait calculer la puissance des appareils de chauffage en comptant sur 70 unités de chaleur à fournir en une heure par mètre carré de surface de muraille de $0^{m},33$ à $0^{m},35$ d'épaisseur, et sur 80 unités par mètre carré de surface de vitre (709 et 710).

Dulong et Petit ont adopté, pour le chauffage par la vapeur, la formule suivante :

$$M = ks(T - \theta)^{1,233}.$$

M quantité de chaleur transmise par contact (en calories);
T — θ différence des températures des deux fluides (eau et vapeur, air et vapeur, etc.);
s surface de la paroi à travers laquelle se transmet la chaleur;
k quantité de chaleur transmise par heure et par mètre carré (en calories).

Le coefficient *k* a les valeurs suivantes, d'après Fouché, pour les tuyaux en fer ou en cuivre :

Dans l'air calme (tuyau vertical)		$5^{cal},69$
Dans un courant d'air transversal au tuyau.	Vitesse de $1^{m},87$ par seconde.	14 ,15
	Id. de 4 ,30 *id.*	23 ,90
	Id. de 4 ,80 *id.*	26 ,80
Dans l'air, la surface du tuyau étant arrosée d'eau à la température θ. . .		465 ,00
Dans l'eau non bouillante		371 ,00
Id. bouillante		2.000 à 2.500 ,00

722. Calorifères à eau chaude et à basse pression. Nous allons calculer les dimensions d'un tel calorifère destiné à émettre 36000 unités de chaleur en une heure ou 10 unités par seconde, la température de l'eau étant de 80° dans la chaudière et dans la colonne ascensionnelle, qui a 2 mètres de hauteur verticale; de 55° en moyenne dans le tuyau de chauffe, que l'on suppose avoir une pente totale de 2 mètres, uniforme sur tout son circuit, et de 30° en rentrant dans la chaudière.

Chaque kilog. d'eau perdant 50 unités de chaleur dans sa circulation, le poids d'eau qui doit sortir de la chaudière en une seconde est $\frac{10}{50} = 0^{kg},2$, dont le volume moyen dans le tuyau est, en prenant 0,000466 pour coefficient de la dilatation absolue de l'eau pour 1° (481),

$$0,2(1 + 0,000466 \times 55) = 0,2051 \text{ de litre.}$$

En admettant que la quantité de chaleur que laisse passer la surface de chauffe, à égalité de différence de température, est à peu près la même que pour la vapeur (721), chaque mètre carré de surface de fonte laisse passer en une heure, pour la différence de 40° entre la température 55° de l'eau et celle 15° de l'air, $1,80 \times 550 \frac{40}{85} = 466$ unités de chaleur.

La surface de chauffe nécessaire pour laisser passer les 36000 unités de

chaleur est donc :

$$\frac{36000}{466} = 77,25 \text{ mètres carrés.}$$

Le diamètre du tuyau de chauffe étant $0^m,09$, sa circonférence est $0^m,2827$ (*Int.* 294), et, par suite, sa longueur sera $\frac{77,25}{0,2827} = 273$ mètres. Prenant 5 mètres pour les parties qui sont en dehors de la pièce à échauffer, et qui comprennent la colonne ascendante et les raccordements du tuyau de chauffe avec cette colonne et la chaudière, on a 278 mètres pour le développement total de la circulation.

La vitesse de circulation de l'eau dans les tuyaux est due à la différence des pressions produites par deux colonnes d'eau de 2 mètres de hauteur verticale, l'une à 55° en moyenne et l'autre à 80°, cette différence étant exprimée par une hauteur d'eau à 55°. Or la première, c'est-à-dire la colonne descendante, presse, par décimètre carré de section, de $\frac{1}{1+0,000466\times 55}\,20 = 19^{kg},50$, et la colonne ascendante, de $\frac{1}{1+0,000466\times 80}\,20 = 19^{kg},28$; par conséquent, la vitesse de circulation est due à une hauteur d'eau à 55° correspondant à $0^{kg},22$. En eau froide, cette colonne serait $0^m,022$; en eau à 55°, elle est

$$0,022(1 + 0,000466 \times 55) = 0^m,02256\,;$$

ce qui fait $0^m,00008115$ par mètre courant de tuyau.

Consultant le tableau du n° 187, on voit que sous la charge $0^m,00007721$ le diamètre $0^m,09$ débite $0^l,3181$ par seconde ; ce diamètre est donc grandement suffisant pour l'application qui nous occupe. Il n'est cependant pas aussi exagéré qu'il paraît l'être ; d'abord à cause des changements de direction des tuyaux, et ensuite parce que la résistance étant proportionnelle au carré de la vitesse, le tableau du n° 187 donne, dans ce cas, une résistance ou charge trop faible, en la prenant pour la vitesse moyenne dans la conduite.

Pour chauffer un atelier de 13 mètres de largeur sur $3^m,25$ de hauteur, une seule allée d'un tuyau de $0^m,16$ de diamètre sur toute la longueur de l'atelier paraît suffisante, la température de l'eau étant de 75 à 80° (721). Dans la pratique, l'eau étant à 80° et l'air à 15°, c'est-à-dire la différence étant de 65°, il convient de considérer $1^{mq},50$ à $1^{mq},75$ de surface de chauffe comme l'équivalent de 1 mètre carré à la vapeur, et de chauffer 35 à 40 mètres cubes de salle par mètre carré de fonte. Cependant Grouvelle admet que 1 mètre carré de fonte chauffé, soit à la vapeur, soit par une circulation d'eau à 80 ou 90°, entretient 80 mètres cubes d'atelier à 15°, et condense $1^{kg},60$ de vapeur par heure.

On suivrait une marche analogue pour chauffer une pièce quelconque à l'aide de l'eau de condensation d'une machine à vapeur, qui est ordinairement à 36 ou 40° ; dans ce cas, on éléverait l'eau mécaniquement

Au lieu de chauffer directement l'eau à l'aide d'un foyer, Grouvelle a employé la vapeur; ce qui est surtout avantageux pour les grands ateliers qui demandent plusieurs circuits, comme, par exemple, les filatures à plusieurs étages. Le réservoir d'eau est formé par la colonne montante, qui s'élève jusqu'à l'étage supérieur, et il est parcouru dans toute sa hauteur par le tuyau qui amène la vapeur du générateur. Sur ce réservoir s'embranchent les tuyaux de chauffe qui parcourent chacun un étage dans toute sa longueur. L'eau part du réservoir par les tuyaux de chauffe des étages supérieurs et y rentre par ceux des étages inférieurs. Des robinets permettent de régler la circulation de l'eau dans chaque tuyau selon les besoins du chauffage.

723. Calorifères à eau chaude et à haute pression. On distingue les systèmes Duvoir et Perkins. Dans le premier, la pression est portée jusqu'à 5 atmosphères, et dans le second elle est beaucoup plus élevée.

Un procédé de M. Duvoir consiste à chauffer l'air extérieur en le faisant passer sur des tuyaux dans lesquels circule l'eau chaude; cette disposition est employée depuis longtemps en Angleterre. Une autre disposition de M. Duvoir, et qui forme la base de tous ses appareils, consiste dans un système de *poêles à eau*, placés dans les salles mêmes, et chauffés en les faisant traverser par une seule circulation d'eau dont ils font partie intégrante : l'eau passe d'un poêle à l'autre par l'intermédiaire d'un tuyau.

Le système Perkins est formé d'une seule circulation d'eau par un tuyau d'un petit diamètre; ce qui le rend peut-être moins dangereux que celui de M. Duvoir, quoique la pression y soit beaucoup plus élevée.

Les tuyaux employés à la fabrication de ce dernier genre de calorifères sont en fer creux, et ont $0^m,025$ à $0^m,027$ de diamètre extérieur et de $0^m,0125$ à $0^m,0150$ de diamètre intérieur. Ces tuyaux sont composés de bouts qui ont 4 mètres de longueur et qui sont vissés entre eux. On les essaye à 200 atmosphères de pression; mais, théoriquement, ils peuvent supporter une pression bien supérieure (202, 772).

Dans les calorifères construits en Angleterre, la température de l'eau à la partie supérieure du circuit varie de 150 à 200°, ce qui correspond à des pressions de $4^{atm},50$ à 15 atmosphères; mais, dans les foyers, les tubes atteignant quelquefois la température rouge, la pression est beaucoup plus grande (477, 494). A la partie inférieure de la colonne descendante, près du foyer, la température n'est que de 60 à 70°.

Le développement total d'une circulation n'excède jamais 150 à 200 mètres; si la surface de chauffe exige une plus grande longueur, on emploie plusieurs circulations, qui peuvent être chauffées par le même foyer. La longueur du tube renfermée dans le foyer est le 1/6 environ de la longueur totale du circuit. La capacité du réservoir d'expansion, placé à la partie supérieure du circuit, doit être au moins les 0,15 de la capacité totale des tubes. En Angleterre, on compte sur 2 pieds de longueur de tuyau pour chauffer 100 pieds cubes de capacité; ce qui revient à peu près, en prenant la moyenne entre $0^m,025$ et $0^m,012$ pour

le diamètre de la surface de chauffe, à 1 mètre carré de surface de chauffe pour 80 mètres cubes de capacité.

Le remplissage s'opère généralement au moyen d'une pompe foulante, qui sert à essayer l'appareil sous une pression d'au moins 200 atmosphères.

Il y a perte d'eau dans ces calorifères, et dans les grands appareils il faut ajouter 1/2 litre d'eau tous les 8 ou 10 jours.

En France, M. Gandillot établit de ces calorifères dont les tubes ont de $0^m,03$ à $0^m,04$ de diamètre; ils sont formés de bouts réunis par des manchons à vis, et ils résistent à des pressions de 40 atmosphères et plus.

724. Chauffage des liquides. Lorsqu'on chauffe directement un liquide dans une chaudière à l'aide d'un foyer placé dessous, la surface de chauffe peut se calculer d'après la considération que 1 mètre carré de cette surface laisse passer la quantité de chaleur nécessaire pour vaporiser de 15 à 20 kilog. d'eau en une heure (749); mais il convient de prendre 1 mètre carré de surface de chauffe pour 3 à 5 kilog. de houille ou 6 à 10 kilog. de bois à brûler par heure. Les différentes parties du fourneau se déterminent comme pour les chaudières à vapeur ordinaires (542, 543, 742).

Chauffage des bains. Supposons qu'il s'agisse de déterminer la quantité de charbon nécessaire pour chauffer l'eau dépensée pour 25 bains, l'eau froide étant à 5°.

Une baignoire contenant de 280 à 300 kilogrammes d'eau à 30°, la quantité de chaleur dépensée est, pour chauffer l'eau des 25 bains, $300 \times 25\,(30 - 5) = 187\,500$ unités, qui absorbent à peu près 31 kilog. de houille; on peut utiliser 6000 unités de chaleur par kilog. de houille. On ne chauffe qu'une partie de l'eau, et on l'élève à la température de 70 à 80°; le poids d'eau à échauffer de 5 à 80° est alors, pour les 25 bains, $\frac{187\,500}{75} = 2\,500$ kilog.

725. Chauffage des corps solides. Dans les fours destinés à fondre la fonte, la quantité de chaleur utilisée, c'est-à-dire absorbée par le métal pour s'échauffer et se fondre, n'est que les 0,14 de la chaleur totale développée par le combustible ($0^{kg},3$ de coke pour fondre 1 kilog. de fonte, lequel, projeté dans 20 kilog. d'eau, en élève la température de 14°. *Traité de la chaleur*, par Péclet). Grouvelle évalue cette quantité de chaleur utilisée à 0,20 dans les fours de fusion de la fonte; à 0,05 dans les fours à puddler, ainsi que dans les fours à réchauffer les fers et les tôles, et à 0,02 dans les fours de verreries et dans ceux à cuire les poteries, les porcelaines, etc. (590).

D'après Ebelmen, la quantité de chaleur qu'emportent les gaz est les 0,62 de la puissance calorifique du combustible pour le haut fourneau de Clairval, marchant au charbon de bois, et les 0,67 pour celui d'Audincourt, marchant avec du bois et du charbon de bois. Cette perte est plus considérable pour les *hauts fourneaux* au coke; ainsi l'on brûle de 140 à 220 kilog. de coke pour 100 kilog. de fonte dans ces derniers, au lieu de 100 à 160 kilog. de charbon dans les premiers (587).

Dans les fours continus destinés à la fabrication de la chaux, on emploie 1 volume de houille ou 1 volume 1/2 de coke pour 4 volumes de pierre à chaux. Les petits fours donnent 12 hectolitres de chaux par jour et les plus grands de 90 à 100 hectolitres.

On brûle de 135 à 210 kilog. de bois par mètre cube de plâtre cuit, du poids de 1500 ou 1600 kilog. Lorsqu'on cuit le plâtre au moyen des gaz perdus dans la fabrication du coke (535, 589), il conviendrait de faire arriver sur le gaz un courant d'air qui en opérerait la combustion, et au delà de la flamme un second courant d'air qui amènerait les gaz résultant de la combustion à 200 ou 300°, attendu que la cuisson du plâtre s'opère à 100°. (Consulter la 5e partie.)

726. Chauffage au gaz. Le gaz d'éclairage, comme agent de chauffage, joue un rôle très important. On admet que 1 mètre cube de gaz développe 6000 calories; mais ce nombre n'est pas encore définitivement fixé.

Les emplois du gaz comme combustible sont nombreux :

1° Cuisine : réchauds, rôtissoires, grilloirs;

2° Appartements : appareils chauffant par rayonnement, soit par réflecteurs, soit par matières incombustibles portées à l'incandescence (asbeste, amiante, fonte). — Calorifères chauffant par la production d'air chaud ;

3° Divers : Chauffe-bains, lessives, bouilleurs rapides, grilloirs à café, fers et machines à repasser ;

4° Industrie : becs Bunsen, machines à griller les tissus, étuves, moufles pour fondre les métaux, etc.

Il faut dépenser environ 1200 litres de gaz, pendant l'été, pour chauffer de 20 à 35° les 280 litres d'eau qu'exige un bain renouvelé convenablement. Pendant l'hiver, il faut 2000 litres de gaz pour élever 280 litres d'eau de 10 à 35°.

VENTILATION

727. Air nécessaire à la respiration. L'air est formé, en volumes, de 0,21 d'oxygène pour 0,79 d'azote; il contient, en outre, 0,0004 à 0,0006 d'acide carbonique, et une quantité très variable de vapeur d'eau. D'après J.-B. Dumas, un homme fait 16 à 17 expirations par minute; il transforme par heure en acide carbonique tout l'oxygène contenu dans 90 litres d'air, et le volume d'air qu'il expire par heure est de 333 litres contenant 0,04 d'acide carbonique.

728. Air vicié par la transpiration. Un homme, par sa respiration cutanée et pulmonaire, produit en une heure de 45 à 77 grammes de vapeur, soit en moyenne 61 grammes. Barral a trouvé 50 grammes. 1 mètre cube d'air saturé à 15° contenant 13 grammes de vapeur (601), le volume d'air à moitié saturé qu'un homme vicie en une heure par sa transpiration est $\frac{45}{6,5} = 6^{mc},92$ à $\frac{77}{6,5} = 11^{mc},85$.

La proportion d'acide carbonique que contient cet air est :

$$0{,}04\,\frac{0{,}333}{6{,}92} + 0{,}0005 = 0{,}0024, \text{ à } 0{,}04\,\frac{0{,}333}{11{,}85} + 0{,}0005 = 0{,}0016.$$

La limite précédente 6^{mc},92 à 11^{mc},85 est celle qui correspondrait à une ventilation dans laquelle l'air pur arriverait par un grand nombre d'ouvertures pratiquées dans le sol et s'écoulerait par des orifices supérieurs; ce qui peut être en partie réalisé dans de grands amphithéâtres. Mais quand le chauffage a lieu par l'air de ventilation, l'air arrivant et partant par des orifices pratiqués près de la surface du sol, l'air pur se mélange avec l'air vicié, et l'on conçoit que pour que l'air de la salle ne contienne nulle part trop d'acide carbonique, il faut une ventilation plus active. Dans les appareils de chauffage et de ventilation examinés aux n°s 733 et suivants, on s'est basé sur des nombres plus grands.

Dans une salle d'école renfermant 180 enfants de 7 à 10 ans, Péclet a reconnu qu'avec une ventilation de 6 mètres cubes par heure et par enfant, il n'y avait qu'une faible odeur dans la salle, mais 15 à 20 mètres cubes procurent une ventilation excellente. M. Leblanc a remarqué qu'à la ventilation de 6 mètres cubes par heure et par enfant, la quantité d'oxygène disparue était de 0,0016, ce qui pouvait correspondre, au plus, à une proportion d'acide carbonique de 0,0022; aucune odeur ne régnait dans la salle, où la température était de 17°, et la respiration n'y était nullement gênée. La ventilation ayant été réduite à 4^{mc},65 d'air par heure et par individu, la proportion d'acide carbonique s'est élevée à 0,0047, et il n'y avait pas d'odeur sensible. Enfin la salle ayant été complètement fermée et la ventilation régulière annulée, après le même nombre d'heures de séjour que dans les expériences précédentes, la proportion d'acide carbonique s'est élevée à 0,0087 et l'atmosphère était lourde. La température intérieure était de 18°, celle extérieure 16°.

Dans une expérience de Péclet à l'ancienne Chambre des députés, la salle contenant 1 000 à 1 100 personnes, vers 4 heures du soir, on ne constatait aucune odeur désagréable, la ventilation étant de 6 à 7 mètres cubes par heure et par personne; mais il y avait nécessairement de l'air appelé par les fissures des portes et des fenêtres, et par les portes qui s'ouvraient de temps en temps. M. Leblanc a donné 4400 mètres cubes pour le volume total d'air sortant des caves et 11000 mètres cubes pour le volume total débité par les cheminées d'appel, le volume d'air par heure et par personne étant de 18 mètres cubes, et l'air renfermant 0,0025 d'acide carbonique. Mais pour une salle de réunions ordinaires, il est préférable d'adopter 40 à 50 mètres cubes d'air.

D'après des expériences faites à la Conciergerie par Boussingault, Leblanc et Péclet, la dose d'air nécessaire à un détenu renfermé dans une cellule est de 10 mètres cubes par heure ; la cellule contenait une cuvette mobile, cause exceptionnelle d'insalubrité.

On a reconnu que les salles d'hôpitaux, de chirurgie et les ateliers insalubres ne pouvaient être assainis et dépouillés de toute mauvaise odeur qu'avec une ventilation de 100 à 150 mètres cubes d'air par heure

et par individu (737). Pour les varioleux, 200 mètres cubes sont nécessaires, et pour les femmes en couches il faut 300 mètres cubes.

De ce qui précède, il résulte, d'après Péclet : 1° qu'une ventilation de 6 mètres cubes par heure et par individu est une limite au-dessous de laquelle il ne faut pas descendre, quand l'air de ventilation est mêlé avec l'air de la pièce et qu'il n'existe aucune cause particulière d'insalubrité; 2° que quand la ventilation a lieu de bas en haut, par tous les points du sol ou par des orifices très nombreux et très rapprochés, une ventilation de 7 à 11 mètres cubes, par heure et par personne, fournit à chacun de l'air paraissant suffisamment pur; 3° que, dans presque tous les cas, il y a des causes d'insalubrité pour lesquelles le chiffre de la ventilation doit être élevé à un point que l'expérience seule peut déterminer.

Le plus souvent, le chiffre de 25 mètres cubes est nécessaire par heure et par individu.

Pour les écuries, on adopte 180 à 200 mètres cubes par cheval.

D'après M. Leblanc, une bougie s'éteint subitement dans une atmosphère contenant de 4 à 4,5 p. 100 d'acide carbonique. La flamme des chandelles persiste quelque temps après l'extinction des bougies ; il en est de même des lampes de mineurs garnies de leur porte-mèche; les lampes à double courant d'air, ou même les lampes de mineurs dégarnies de leur porte-mèche, peuvent encore brûler quand les autres modes d'éclairage ne peuvent plus servir. Lorsque l'air renferme 4 à 5 p. 100 d'acide carbonique, et que la flamme d'une bougie n'y peut plus subsister, la respiration devient gênée, sans que le travail cesse, pourvu que la température ne soit pas trop élevée. Mais quand l'atmosphère renferme 10 p. 100 d'acide carbonique, elle cesse d'être respirable, et les hommes qui y pénétreraient s'exposeraient à l'asphyxie.

729. Air vicié par l'éclairage. Dans la combustion des matières employées à l'éclairage, on peut admettre que l'air qui alimente la combustion n'est brûlé qu'au 1/3.

Tableau des poids de quelques matières brûlées en une heure, des volumes d'air nécessaires à la combustion, et des quantités relatives de lumière produite.

DÉSIGNATION DES MATIÈRES.	POIDS BRULÉ.	VOLUME D'AIR brûlé au tiers.	LUMIÈRES relatives.
	gr.	m. c.	
Chandelles de six à la livre.	11	0,322	11
Bougie	11	0,322	14
Lampe gros bec.	42	1,266	100

La flamme d'une bougie s'éteignant lorsque l'air renferme 4 p. 100 d'acide carbonique, comme il est probable que la combustion doit éprouver des influences analogues à celles qui se produisent sur la

respiration, il faut compter sur une ventilation additionnelle minimum de 6^{mc} d'air par heure et par bougie, de 24^{mc} par lampe gros bec et de 25^{mc} par bec de gaz brûlant 100 litres à l'heure, pour que la combustion ait toujours lieu dans de bonnes conditions.

L'air vicié par la respiration et la transpiration est encore propre à l'alimentation du foyer de chauffage, qui, dans les appartements chauffés par le rayonnement du combustible, suffit généralement à l'appel de tout l'air nécessaire à la ventilation.

730. Chaleur produite par la respiration et la combustion. Les quantités de carbone et d'hydrogène brûlées en une heure par la respiration d'un homme étant équivalentes à 10 grammes de carbone d'après Dumas, et à $11^{gr},3$ d'après Andral et Gavarret, la chaleur développée est (508), en adoptant le chiffre de Dumas, $8080 \times 0,010 = 80,8$ calories. Une partie de cette chaleur est employée à former les 61 grammes de vapeur fournis par la respiration (728), partie qui est (490), 38° étant la température du corps ou de cette vapeur, $0,061(606,5 + 0,305 \times 38) = 37,7$ unités. Le reste $80,8 - 37,7 = 43,1$ unités est employé à chauffer l'air environnant et il joue un grand rôle dans le chauffage des lieux habités, puisqu'il peut porter de 0 à 15° un volume d'air de $\frac{43,1}{1,293 \times 15 \times 0,238} = 9^{mc},3$ (464, 488). Ce qui indique que s'il n'y avait pas de refroidissement par les parois d'une pièce habitée dont l'air aurait été préalablement porté à 15°, cette température resterait constante en y introduisant $9^{mc},3$ d'air à 0° par heure et par personne. Il y aurait même encore à tenir compte de la chaleur cédée à l'air par la vapeur en passant de 38° à 15°, chaleur qui est par heure et par personne $0,061 \times 0,475(38 - 15) = 0,666$ d'unité (488).

Un mètre cube de gaz (densité 0,55) dégage 7150 calories par heure. Une lampe ordinaire (brûlant 30 à 40 grammes d'huile à l'heure) en dégage 3 à 400. Une bougie ordinaire (brûlant 10 grammes à l'heure) développe 100 calories.

La puissance calorique de l'huile (densité 0,91) = 9800 calories; celle du pétrole (densité, 0,84) = 10000 calories environ.

La température la plus salutaire pour les lieux habités est, d'après le Dr de Chaumont, de 17°.

731. Ventilation par le gaz. On obtient une ventilation très active et très économique en faisant servir au renouvellement de l'air le gaz consommé pour l'éclairage.

Plusieurs applications de ce système de ventilation ont été faites, notamment à la salle de l'Odéon royal de Munich, la salle de concerts Pleyel-Wolff à Paris, le théâtre Beaumarchais, l'école Monge, les magasins d'exposition et différents bureaux de la Compagnie parisienne du gaz, une salle de chirurgie rue Jean-Goujon, etc.

La quantité de gaz consommée pour la ventilation est de 40 p. 100 de la consommation totale de l'éclairage. La ventilation de jour est assurée par des brûleurs spéciaux.

732. La température du corps humain est de 37 à 38°; celle des oi-

seaux, de 40 à 44°; celle des mammifères, de 37 à 40°, et celle des poissons, de 14 à 25°.

Pour les *ventilateurs mécaniques*, voir n°s 354 à 359 et n° 550.

EXEMPLES D'ÉDIFICES PUBLICS CHAUFFÉS ET VENTILÉS

733. Chauffage et ventilation des prisons cellulaires de Mazas et de Provins. (Extrait du *Traité de la chaleur*, de Péclet.)

1° La commission a adopté le projet Grouvelle, *basé sur le principe de la circulation de l'eau chaude*, avec le secours de la vapeur comme moyen de transmission de la chaleur aux réservoirs alimentant la circulation de l'eau dans les tuyaux de chauffage (722), mais en apportant au projet les modifications suivantes :

1° Porter à 10 mètres cubes par heure le volume d'air à fournir à chaque cellule de 20 mètres cubes de capacité;
2° Élever à 15° la température constante des cellules;
3° Établir une double circulation d'eau chaude, et en sens contraire, dans le canal de chauffage, afin qu'en chaque point du circuit la température moyenne des tuyaux fût sensiblement constante;
4° Établir la ventilation des cellules par les tuyaux de descente des matières fécales.

La ventilation des 1200 cellules, divisées en 6 bâtiments d'un rez-de-chaussée et de 2 étages, est produite par une cheminée d'appel en briques, de 2m,15 de diamètre intérieur et de 29 mètres de haut, placée au centre des 6 bâtiments à cellules. La cheminée des trois générateurs est en tôle et placée au centre de la cheminée d'appel; son diamètre est de 0m,80.

La sous-commission, composée de Péclet, Leblanc et Thauvin, a obtenu les résultats suivants en 1850-51 :

L'appel par la cheminée s'est élevé à 30000 mètres cubes par heure; ce qui correspond à un renouvellement d'air de 25 mètres cubes par cellule, au lieu de 10 mètres cubes, limite inférieure exigée par le cahier des charges. La température a été maintenue pendant l'hiver entre 13° et 16° dans tous les bâtiments occupés, corridors et cellules. Pour un chauffage continu de 12 jours et 12 nuits, la température extérieure étant de 7°,5, et la vapeur venant se condenser dans les serpentins placés dans les réservoirs d'eau chaude étant maintenue entre 2 et 3 atmosphères, la température des cellules s'est élevée jusqu'à 19°,50 et 20°,72 au rez-de-chaussée, et jusqu'à 20°,94 et 23°,31 au premier étage. Les différences entre les températures d'un même étage proviennent de l'orientation des cellules.

Pendant l'hiver de 1849-50, pour une consommation de 13kg,50 de houille par heure dans le foyer d'appel, on a expulsé des caves 14800 mètres cubes d'air par heure, et pour une consommation de 22kg,33 de houille dans le même temps, la ventilation s'est élevée à 24700 et 30900 mètres cubes. Pendant les grandes chaleurs de l'été, pour 20 kilogrammes de houille, la ventilation a varié de 22900 à 25000 mètres cubes.

Pendant l'hiver de 1850-51 : 1° l'air expulsé s'est élevé à 29200 mètres cubes pour 20 kilog. de houille brûlés par heure dans le foyer d'appel; 2° la fumée étant bien refroidie sous des plaques de fonte avant d'arriver à la cheminée des générateurs, cette cheminée a peu d'influence sur la ventilation générale; après une interruption de chauffage de 24 heures, la ventilation de 29200 n'a descendu qu'à 28200; 3° la consommation du foyer d'appel ayant été réduite de 20 à 15 kilog. par heure, la quantité d'air expulsée a été trouvée comprise entre 28100 et 31500 mètres cubes; cette faible di-

minution est due au peu d'influence de l'activité du foyer sur le tirage de la cheminée au delà d'une certaine limite.

Pendant l'hiver 1850-51, pour les bâtiments dans lesquels les prises d'air étaient ouvertes sur le corridor, la consommation de houille pour le chauffage a été de 400 kilog. par bâtiment et par jour, pour obtenir une température moyenne intérieure de 15°,15, avec une température extérieure de 3°,89, c'est-à-dire pour un excès de 11°,25. Pour les bâtiments dont les prises d'air étaient extérieures, la consommation a été de 500 kilog. de houille pour obtenir une température moyenne intérieure moins élevée de près de 1 degré. Le chauffage de l'administration a exigé 150 kilog. de combustible par jour pour les mêmes circonstances atmosphériques.

Pendant les 7 mois de chauffage, la température moyenne à Paris étant 6°,5, admettant 14° pour température moyenne intérieure, c'est-à-dire un excès de 7°,5, la consommation moyenne par bâtiment sera de 270 kilog. de houille, et 100 kilog. pour l'administration. Ainsi la dépense totale sera de $270 \times 6 + 100 = 1720$ kilog. par jour.

Quant à la ventilation, la dépense moyenne de combustible est de 350 kilog. par jour d'hiver, et de 400 kilog. par jour le reste de l'année; mais pour obtenir une ventilation de 30000 mètres cubes par heure, la consommation de combustible est de 20 kilog. par heure en hiver et 25 kilog. en été.

Les murs ont 0m,60 d'épaisseur, et leur surface totale exposée au contact de l'air est à peu près de 13000 mètres carrés, non compris les surfaces des voûtes et du sol, qui transmettent peu de chaleur. La surface totale des vitres est de 2173 mètres carrés. Admettant que $M = 15$ pour la quantité de chaleur transmise par mètre carré de muraille et par heure (709), et $M = 22$ pour la transmission des vitres dans les mêmes circonstances, la perte totale de chaleur par les vitres et les murailles sera $15 \times 13000 + 22 \times 2173 = 242806$ unités.

Pour élever 30000 mètres cubes d'air de 7°,5 à 14°, température à laquelle il sort des cellules, il faut $1,293 \times 6,5 \times 0,238 \times 30000 = 60008$ unités de chaleur (464, 488). La chaleur produite par les 1200 détenus est $(43,1 + 0,666)\,1200 = 52519$ unités (730).

La chaleur que doit fournir le calorifère est alors $242806 + 60008 - 52519 = 250295$. Chaque kilogramme de houille produisant un effet utile de 3750 unités, on brûlera par heure 66kg,75 de houille, et par jour $66,75 \times 24 = 1602$ kilog., au lieu de 1620 kilog. qu'a donnés l'expérience.

2° *La prison cellulaire de Provins* a la même disposition que la prison de Mazas, mais elle ne contient qu'un bâtiment et 39 cellules. Les appareils de chauffage ont aussi été établis par M. Grouvelle; la chaudière chauffe directement l'eau chaude de circulation, et c'est la chaleur de la fumée de la chaudière qui produit la ventilation en hiver; en été, un foyer spécial d'appel produit la ventilation. La cheminée du calorifère a 0m,31 de diamètre, et elle s'élève de 5 mètres dans la cheminée d'appel, qui a 18 mètres de hauteur, 1m,06 de diamètre à la base et 0m,60 au sommet. Les murailles ont 0m,60 d'épaisseur moyenne et 1059 mètres carrés de surface. La surface des vitres est de 107mq,50.

Dans des expériences faites du 15 mars au 6 avril par M. Gentilhomme,

la température moyenne pendant le jour étant de 6° et les nuits très froides, la température moyenne de la journée a été de 14°,95 dans les cellules, de 15°,16 dans la galerie donnant entrée aux cellules, et de 18° dans le greffe. La température moyenne a été de 1° plus élevée dans les cellules exposées au midi que dans celles exposées au nord. Le chauffage était toujours suspendu pendant la nuit, et cependant l'abaissement de température n'a jamais dépassé 0°,31 ; ce qui doit être attribué à la grande quantité de chaleur contenue dans les murailles et dans l'eau chaude.

Des expériences faites sur les tuyaux de descente de quelques cellules ont donné les volumes d'air suivants expulsés de chaque cellule par heure :

FOYER DE LA CHAUDIÈRE en plein feu, et le foyer d'appel éteint.		FOYER DE LA CHAUDIÈRE éteint depuis douze heures, et le foyer d'appel éteint.		FOYER DE LA CHAUDIÈRE éteint, et le foyer d'appel allumé.			
	m. c.		m. c.				m. c.
Rez-de-chaussée.	»	Rez-de-chaussée.	32,4	Rez-de-chaussée,	côté du	nord.	64,8
1er étage.	59,4	1er étage.	28,8		*id.*	midi.	43,4
2e étage	81,0	2e étage	16,0	1er étage.	*id.*	nord.	97,2
					id.	midi.	72,7
Moyenne.	70	Moyenne.	25,7	2e étage.	*id.*	nord.	95,7
					id.	midi.	80,0
				Moyenne			75,6

Les volumes totaux d'air écoulés en une heure par la cheminée d'appel étaient respectivement, dans la première, la deuxième et la troisième condition du tableau précédent, 3400, 1051 et 2940 mètres cubes; ce qui fait par cellule 87,27 et 75,4 mètres cubes.

Le chauffage a lieu avec de la tourbe, dont la consommation moyenne est de 367 kilog. par jour, équivalant à 175 kilog. de houille.

734. L'appareil de chauffage de l'église Saint-Roch a aussi été établi par M. Grouvelle. Il consiste en une circulation d'eau chaude à basse pression placée dans des caniveaux établis sous le sol; l'air extérieur est appelé dans ces caniveaux, d'où il sort échauffé pour se répandre dans l'église.

Dans un caveau circulaire qui règne sous le pourtour de la chapelle de la Vierge, est placée une chaudière ordinaire à 2 bouilleurs, de 12 chevaux environ. Un tuyau en fonte, de 0^m,14 de diamètre, dont les bouts sont réunis par des joints à boulons, et d'un développement de 168 mètres, part du sommet de la chaudière et passe sous le bas côté droit de l'église, en s'élevant par une pente d'environ 0^m,03 par mètre; son point culminant est sous l'orgue; il revient par le côté gauche de l'église en suivant la même pente, et finit par aboutir à l'un des bouilleurs de la chaudière. Un petit tuyau additionnel, placé après coup, circule en sens contraire du tuyau principal, parallèlement au tuyau de retour, et finit par déboucher dans ce tuyau à son point culminant,

c'est-à-dire sous l'orgue. Les tuyaux circulent dans un canal dont chaque paroi verticale est formée de deux murailles en briques légèrement espacées, afin de diminuer le refroidissement. Le fond est formé de planches, dans lesquelles sont pratiquées les ouvertures d'admission de l'air froid; c'est dans le plafond du canal que sont pratiquées les prises d'air chaud, qui viennent déboucher dans le sol de l'église. Après chaque bouche de chaleur se trouve une cloison transversale en bois qui ferme complètement le canal, et immédiatement après se trouve une arrivée d'air froid, qui, par cette disposition, est échauffé par toute la longueur de tuyau comprise entre deux bouches de chaleur. Un système analogue, mais dont le tuyau n'a que $0^m,12$ de diamètre et 86 mètres de longueur, part de l'autre extrémité de la chaudière et circule sous la chapelle de la Vierge et le calvaire.

Des valves placées sous les tuyaux de départ et d'arrivée permettent de modifier ou même de supprimer la circulation dans chacune des grandes artères. Sur le pourtour de l'artère principale, 4 renflements de 3 mètres de longueur et de $0^m,35$ de diamètre augmentent encore la surface de chauffe; 4 autres renflements, en forme de poêles de différents diamètres, sont placés à l'orifice des bouches principales, et des petits embranchements sans retour favorisent encore le tirage des bouches qui ne sont pas directement placées sur le parcours.

Le tuyau de fumée a $0^m,35$ de diamètre; il est en tôle, et sur une longueur de 7 mètres il chauffe l'air qui alimente une bouche isolée de la chapelle de la Vierge.

Surface de chauffe, y compris les bouilleurs.	$15^m,40$
Surface de la grille.	0 ,40
Surface de refroidissement de la circulation.	164 ,85
Volume de l'eau qui s'échauffe	3 ,008
Volume de l'eau qui se refroidit.	4 ,218
Température de l'eau dans la chaudière.	120°
Id. à sa rentrée dans la chaudière. . . .	102°
Température moyenne de l'eau en circulation	111°
Différence maximum de niveau.	3 à 4^m
Nombre de bouches grillées versant l'air dans l'église. . .	22
Surface libre de chacune de 21 de ces bouches.	$0^m,135$
Id. de la bouche placée sous l'orgue	$0^m,400$
Id. de toutes les bouches	$3^m,235$
Longueur de l'église.	110 à 115^m
Largeur.	28^m
Hauteur moyenne	15 à 18^m
Superficie, environ.	3150^m
Volume, environ.	32000^m
Surfaces des murailles exposées au refroidissement. . . .	5835^m
Épaisseur moyenne de ces murailles	$0^m,50$
Surface des vitraux.	860^m
Volume des murs et piliers intérieurs.	1800^m
Nombre des places assises.	3500
Nombre des personnes réunies les dimanches ordinaires.	2000 à 4000
Id. les fêtes ordinaires. . . .	4000 à 6000
Id. les grandes fêtes.	6000 à 8000
Surface totale des ouvertures pratiquées dans la voûte et des fissures des fenêtres.	$14^m,15$

Hauteur moyenne à laquelle se trouve toutes ces ouvertures et fissures.	11m,20
Nombre des portes donnant à l'extérieur.	6

M. Pottier a fait voir que le maximum de puissance de l'appareil était limité à maintenir la température intérieure à 16° au-dessus de la température extérieure; ce qui est suffisant dans les plus grands froids.

Après un chauffage continu de 10 jours, on a amené la température intérieure à 16°, et même à 18° le dimanche, la température extérieure étant de 4 à 5°. Une fois que toute la masse de l'église a été échauffée, on a pu ne chauffer que quelques heures par jour, ou mieux, on a pu attendre que la température intérieure se fût abaissée de 2 à 3°, et alors chauffer le temps suffisant pour la ramener à son point de départ : cette dernière marche paraît être plus économique sous le point de vue du combustible. La température extérieure étant 5°, et celle intérieure 12°, il faudrait interrompre le chauffage pendant 5 à 6 jours pour obtenir un abaissement de 1° seulement.

Des thermomètres placés à 8 ou 9 mètres du sol, sous l'orgue, et d'autres à 18 ou 20 mètres, à la corniche du dôme de la chapelle de la Vierge, n'ont, pendant 20 jours, indiqué une température supérieure à la moyenne de 10 thermomètres placés à 2 mètres du sol que de 0°,25 à 0°,75 au maximum. Contre toutes les surfaces intérieures des murailles, et jusqu'à une assez grande distance, la température de l'air est constamment inférieure de 0°,75 à 1°,50 à celle de l'air dans la partie centrale.

Du 17 novembre au 18 janvier, c'est-à-dire en 63 jours comprenant les 10 jours de feu continu, on a brûlé 32170 kilog. de houille, ce qui fait une moyenne de 510 kilog. par jour. Pendant ce temps, la température moyenne intérieure a été de 13 à 14°, et celle extérieure 5 à 6°.

La perte de chaleur par les murailles, pour l'excès de température de 16°, qui correspond au maximum d'effet de l'appareil, et en prenant le coefficient de conductibilité $C = 127$, est $M = 14,80$ par mètre carré et par heure (709), et pour la totalité des murs par heure $14,80 \times 5835 = 86358$ unités. La hauteur des fenêtres étant 4 mètres, pour un excès de température de 16°, $M = 40$ unités; la perte totale de chaleur par les vitraux est alors de $40 \times 860 = 34400$ unités par heure. La perte totale de chaleur par les murailles et les vitres est donc de $86358 + 34400 = 120758$ unités. Admettant que les 40 kilog. de houille brûlée par heure produisent un effet utile de $3850 \times 40 = 154000$ unités de chaleur, la perte de chaleur par la ventilation est donc de $154000 - 120758 = 33242$.

735. Le grand amphithéâtre du Conservatoire des arts et métiers est chauffé et ventilé d'après un dispositif de M. Léon Duvoir-Leblanc. La température ne doit pas être inférieure à 15°, et elle s'élève à 20° pour les réunions de 800 personnes.

Pour obtenir la même température au bas et au sommet de l'amphithéâtre, et extraire une quantité d'air suffisante pour enlever toute

émanation, M. Duvoir a ouvert, vers le bas des gradins, sous les jambes des auditeurs, des orifices d'appel qui sont en communication avec des conduits pratiqués sous les gradins. Ces orifices sont au nombre de 39, dont 34 ont $0^m,08$ sur $0^m,20$, et sont répartis sur les 2/3 de la hauteur de l'amphithéâtre, et dont les 5 autres sont situés sous le premier gradin et ont $0^m,15$ sur $0^m,60$ d'ouverture. Tous les conduits se réunissent dans une pièce située sous l'amphithéâtre et qui contient le calorifère à eau chaude. Dans cette pièce, et à $0^m,50$ au-dessus du sol, s'ouvrent 4 bouches d'appel prolongées par autant de conduits verticaux qui se réunissent en un seul tuyau horizontal communiquant à une grande cheminée d'appel, au bas de laquelle se trouve un foyer qu'on n'allume qu'en cas de besoin. Des tuyaux de circulation d'eau chaude, avec des parties renflées, appelées bouteilles, passent dans le fond du conduit horizontal pour en échauffer l'air et produire l'aspiration.

La cheminée verticale contient deux tuyaux en fonte, l'un qui communique au fourneau d'une machine à vapeur, et l'autre toujours chaud qui sert de commencement de cheminée au calorifère. Ces deux tuyaux sont raccordés avec deux autres plus petits qui forment la cheminée du petit calorifère auxiliaire employé pour déterminer ou accélérer l'appel d'air.

Il a encore été établi dans le plafond de l'amphithéâtre, au-dessus de la partie la plus élevée des gradins, une large bouche d'appel qui communique directement à la cheminée d'appel par un tuyau horizontal.

La somme des sections des 4 orifices qui font appel dans la chambre du foyer, augmentée de la section $0^{mq},49$ de l'orifice pratiqué dans le plafond de l'amphithéâtre, est de $1^{mq},653$.

La section de la cheminée prise à la hauteur du regard est $1^m,10 \times 1^m,03 = 1^{mq},133$. Si l'on en déduit la section $0^{mq},187$ des tuyaux en fonte, il reste pour le passage libre $0^{mq},946$.

Morin, après 9 jours d'expériences, pendant lesquels les températures moyennes intérieure et extérieure ont été de 19° et de 6°, a constaté :

1° Que par suite de l'effet de la circulation de l'air et de l'appel plus considérable par le bas que par le haut, la différence des températures de la partie supérieure et du bas n'a jamais dépassé 1°,5 sur 20°, qui était la température maximum.

2° Que pour les ventilations actives, le volume d'air enlevé a été en moyenne de $15^{mc},23$ par chacune des 800 personnes et par heure, et pour les moins actives $10^{mc},0$. A ce dernier chiffre, aucune odeur désagréable ne se faisait sentir, mais cependant on doit prendre celui de 15 à 16 mètres pour base des projets de ventilation des salles occupées par des personnes en bonne santé ; pour des malades et surtout des blessés, il est loin d'être suffisant. Par des expériences faites à l'hôpital Beaujon, Morin a constaté que la quantité d'air évacuée variait de 40 à 60 mètres cubes par malade et par heure, et qu'elle était à peine suffisante (728, 737).

3° Que le foyer d'appel n'a généralement été entretenu que faiblement ; l'échauffement de la cheminée par le simple tuyau de chauffage et celui des conduits horizontaux par des bouteilles pleines d'eau chaude ont paru suffisants.

4° Que la quantité totale de charbon brûlé par jour pour le chauffage et la ventilation a varié de 180 à 225 kilog. par jour, soit en moyenne 200 kilog. par jour.

736. Chauffage et ventilation de la salle des séances de l'Institut. Note lue par M. Cheronnet à l'Institut (6 mai 1852) :

« La salle des séances de l'Institut est chauffée et ventilée d'après les procédés de M. Duvoir-Leblanc. Le chauffage est produit par 4 poêles remplis d'eau chaude, à travers lesquels circule un courant d'air qui s'échauffe. Ces appareils, situés aux 4 coins de la salle, peuvent fonctionner ensemble ou séparément, suivant la température de l'air extérieur, au moyen de robinets de communication spéciale entre chacun d'eux et le générateur.

« La ventilation se fait par deux grands conduits qui communiquent, l'un avec une série de grilles situées devant les pieds mêmes des membres de l'Institut, l'autre avec un grand nombre de trous faits dans les gradins qui règnent sur les longs côtés de la salle. Le premier de ces tuyaux descend jusqu'au rez-de-chaussée, pour remonter ensuite dans une cheminée, dans laquelle est un réservoir à eau chaude de 12 mètres de hauteur qui produit l'appel. Le second tuyau ne descend que jusqu'à l'entresol, et remonte ensuite dans la cheminée. Un troisième conduit, destiné à la ventilation d'été, part de la partie supérieure de la salle et se rend dans la cheminée.

« Le 5 avril, une expérience a été faite dans le but de constater la quantité d'air extraite de la salle des séances au moyen de deux anémomètres qui sont restés 1 heure simultanément dans les deux conduits. En voici les résultats :

« 1er orifice (rez-de-chaussée), section 0^{mq},970, vitesse de l'air 0^{m},938 par seconde, volume écoulé en 1 heure 3275^{mc},496. 2e orifice, section 0^{mq},3842, vitesse 1^{m},284, volume écoulé en 1 heure 1795^{mc},916. Pendant cette expérience, il a été extrait de la salle 5071 mètres cubes d'air. La salle renfermait 180 personnes, ce qui donne, par heure et par personne, 28^{mc},20. Le temps était beau, et la température était de 12 à 13°.

« Le 19 avril, une seconde expérience a été faite; elle a donné, pour le premier conduit, 4022^{mc},784; pour le second, 1908^{mc},372; total 5931^{mc}. Il y avait 200 personnes dans la salle; le volume d'air extrait a donc été de 29^{mc},65 par heure et par personne. Ce jour-là le temps était très couvert; il a tombé de la neige pendant l'expérience; la température extérieure s'est élevée à 7°,5. »

737. Appareils de chauffage et d'assainissement de l'hôpital Lariboisière, fonctionnant depuis 1854 (717). L'hôpital se compose d'une cour rectangulaire de 45^{m} de largeur sur 115^{m} de profondeur, entourée de portiques derrière lesquels se trouvent des chauffoirs, promenoirs ou réfectoires. L'entrée est au milieu d'un petit côté de la cour, formé par les bâtiments de l'administration, de la pharmacie et des cuisines. La chapelle fait face à l'entrée sur l'autre petit côté de la cour, et de chaque côté de la chapelle sont accolés les bâtiments destinés aux bains ordinaires et à vapeur, aux amphithéâtres et salles de dissection. Les petits côtés de la cour sont prolongés par des bâtiments à plusieurs étages, les bâtiments du devant complétant ceux de l'administration, etc., et les bâtiments du fond contenant, l'un la grande communauté des sœurs et leur infirmerie, et l'autre une vaste buanderie et la lingerie.

Perpendiculairement à chacun des grands côtés de la cour, à plus de 20^{m} les uns des autres et des bâtiments qui prolongent les petits côtés, se trouvent trois pavillons à deux étages, contenant à chaque étage et au rez-de-chaussée une salle de 32 lits, plus une petite au bout, de 2 lits. Chaque pavillon contient ainsi 102 lits, soit 612 lits pour les 6 pavillons. Un mur d'enceinte entoure l'ensemble de ces bâtiments, reliés entre eux par ceux qui forment l'enceinte de la grande cour.

Un projet de chauffage et de ventilation de M. Duvoir-Leblanc a été adopté pour la moitié de l'établissement (côté des femmes), et un autre de Thomas et Laurens pour l'autre moitié (côté des hommes).

1° Le *projet de M. Duvoir* place au rez-de-chaussée de chaque pavillon un calorifère à eau chaude, duquel partent deux tubes contournés en hélice qui s'élèvent dans la cheminée verticale du foyer jusqu'au niveau du grenier. Là, l'eau de ces espèces de serpentins se rend par un tuyau horizontal dans le vase d'expansion placé dans la cheminée d'appel, où il chauffe l'air que des conduits vont puiser dans les salles, au niveau du parquet en hiver et du plafond en été. Du vase d'expansion l'eau se rend par des tuyaux dans les poêles qui chauffent la salle, et de là revient à la chaudière.

L'air nouveau est puisé au niveau du sol, et il pénètre dans les salles en traversant les poêles à eau. La ventilation se fait par l'aspiration de la cheminée d'appel, établie dans les combles, et ayant 5 mètres de hauteur sur 2^{mq},2 de section. Dans chaque salle il y a quatre poêles de 1^{m},50 de hauteur, 0^{m},79 de diamètre, et d'une surface totale de chauffe de 16^{mq},52. Un cinquième poêle placé dans la chambre à deux lits a 1^{m},37 de hauteur, 0^{m},52 de diamètre, et 2^{mq},82 de surface libre de chauffe. Dans chaque salle à 32 lits il y a 18 orifices de sortie de l'air; ces orifices ont 0^{m},30 sur 0^{m},30 au rez-de-chaussée, 0^{m},295 sur 0^{m},235 au premier étage, et 0^{m},30 sur 0^{m},225 au deuxième étage. L'orifice de sortie de l'air de la petite salle à deux lits a 0^{m},30 sur 0^{m},22 au rez-de-chaussée, 0^{m},25 sur 0^{m},27 au premier, et 0^{m},25 sur 0^{m},265 au second.

Le vase d'expansion placé dans la cheminée d'appel a 1^{m},60 de hauteur, et il est formé de trois cylindres ayant le même axe, l'un central de 0^{m},75 de diamètre, un second de 1^{m} de diamètre intérieur et 1^{m},25 de diamètre extérieur, et un troisième de 1^{m},50 et 1^{m},75 de diamètre. La surface de ces trois vases est à peu près de 40^{mq} tout compris, dont 14^{mq} rayonnent librement. Les tuyaux d'eau sont en fer et ont environ 0^{m},05 de diamètre.

L'appareil a une puissance suffisante pour maintenir dans les salles une température supérieure à 15°.

La ventilation, déduite du volume total d'air écoulé par la cheminée d'appel, a oscillé pendant l'essai de la commission entre 64 et 92^{mc} par heure et par lit, et a été par conséquent toujours supérieure à la ventilation de 60^{mc} exigée par le marché. Au contraire, la ventilation déduite du volume d'air entrant dans les salles par les orifices des poêles, qui sont les entrées régulières et utiles de l'air neuf, n'a été en général et en moyenne que de 45 à 50^{mc} par malade. L'évacuation par les ven-

touses de sortie d'une même salle a présenté de très grandes inégalités, même à des instants très rapprochés; l'écart maximum ayant été de 40 à 110^{mc}, il y a des malades qui reçoivent beaucoup moins que le minimum voulu et d'autres beaucoup plus.

M. Grassi, pharmacien de Lariboisière, a obtenu les résultats moyens suivants par malade et par heure :

Ventilation sans chauffage pendant plusieurs nuits d'octobre 1855, la température extérieure ayant varié de 6° à 14°,2, celle intérieure de 14° à 19°, et celle dans la cheminée d'appel de 15°,5 à 34°,5.

Volumes d'air sortis par la cheminée d'appel :

Rez-de-chaussée.	1er étage.	2e étage.	Moyenne.
82^{mc},3	84^{mc},4	55^{mc},3	74^{mc},0

Volumes d'air entrés par les poêles :

21^{mc},6	24^{mc},6	18^{mc},7	21^{mc},6

Volumes d'air entrés par les fissures des portes et des fenêtres :

60^{mc},7	59^{mc},8	36^{mc},6	52^{mc},4

En comparant les volumes d'air sortis des salles à celui qui s'est écoulé par la cheminée d'appel, M. Grassi a trouvé qu'en moyenne il est entré directement du grenier dans la cheminée d'appel 8^{mc},8 d'air par malade et par heure.

Ventilation et chauffage pendant plusieurs nuits de décembre 1855, la température extérieure ayant varié de 4°,5 à 9°, celle intérieure de 13° à 18°,8, et celle dans la cheminée d'appel de 16° à 21°.

Volumes d'air sortis par la cheminée d'appel :

Rez-de-chaussée.	1er étage.	2e étage.	Moyenne.
76^{mc},3	87^{mc},2	83^{mc},7	82^{mc},4

Volumes d'air entrés par les poêles :

26^{mc},0	43^{mc},7	35^{mc},5	35^{mc},1

Volumes d'air entrés par les fissures des portes et des fenêtres :

50^{mc},3	43^{mc},5	48^{mc},2	47^{mc},3

Le volume d'air entré directement du grenier dans la cheminée d'appel a été en moyenne de 18^{mc},5 par malade et par heure.

M. Grassi, comme la commission de réception, regrette que le cahier des charges ne spécifie pas si les 60 mètres cubes d'air exigés par lit et par heure doivent être mesurés dans la cheminée d'appel, ou s'ils se rapportent à l'air nouveau qui entre par les poêles; dans ce dernier cas, les conditions seraient loin d'être remplies. M. Grassi regrette que le marché n'exige pas de ventilation de jour en été, parce que dans cette saison l'équilibre des températures extérieure et intérieure s'oppose à la ventilation naturelle, alors même que les croisées sont ouvertes.

2° Le *projet de Thomas et Laurens* consistait dans la ventilation par pulsion ou insufflation d'air, et dans un chauffage opéré par des *poêles à eau chaude* dont l'eau était chauffée à l'aide de la vapeur. A l'exécution, Thomas et Laurens firent diverses modifications, notamment celle

qui ramenait le chauffage presque en totalité à un *chauffage à la vapeur* facile à régler.

La ventilation est effectuée avec de l'air puisé dans le clocher de la chapelle, à une assez grande hauteur pour qu'il soit pur de toutes les émanations de l'hôpital. Par l'un des quatre piliers creux du clocher, l'air descend dans la chambre du ventilateur placée en tête d'une galerie souterraine qui règne sous tout le portique qui entoure la cour. C'est dans cette galerie, où débouchent les caves de chaque pavillon de malades, que sont placées les machines, ainsi que les tuyaux à air de ventilation, à vapeur et de retour d'eau. Tout le service a lieu dans cette galerie.

Le ventilateur, qui marche sans bruit, aspire l'air nouveau et le refoule par des tuyaux en tôle dans les diverses salles. Il est mis en mouvement au moyen d'une courroie, par une machine à vapeur à détente, sans condensation, d'une force variable, dont la vapeur détendue chauffe les salles, les bains et la buanderie. Tout ce mécanisme est posé dans une chambre close prise sur la galerie souterraine.

Deux générateurs, dont les foyers débouchent dans cette galerie souterraine, sont placés à angle rentrant formé par le bâtiment de droite latéral à la chapelle et le bâtiment du fond parallèle aux pavillons des malades. Ils fournissent, toute l'année, la vapeur nécessaire aux bains d'eau et de vapeur et à la buanderie; en hiver, ils produisent le supplément de vapeur qu'exigent le chauffage des salles de malades et la Communauté des sœurs. La mise en mouvement du moteur ventilant n'exige pas d'augmentation de puissance, puisque la vapeur, après avoir agi sur le piston et perdu une quantité insensible de chaleur, est utilisée pour les bains et le chauffage. La machine est haute, en briques, et placée à côté du fourneau des générateurs. La machine est de la force de 8 chevaux; la vapeur, formée à une pression de 4 à 5 atmosphères, s'y détend jusqu'à la pression de $1^{atm},5$ environ. En enveloppant les tuyaux de vapeur de corps mauvais conducteurs, on réduit à fort peu de chose la perte de chaleur.

La pression de l'air au ventilateur varie de $0^{m},020$ à $0^{m},025$ d'eau, suivant la vitesse de la machine.

Sous le parquet, dans l'axe de chaque salle de malades, se trouve un caniveau amenant l'air de ventilation. Sur ce caniveau on a posé quatre poêles à eau dans chaque salle. Ces poêles sont traversés dans leur hauteur par 12 tuyaux, par lesquels l'air arrive dans les salles. Il y a aussi un poêle semblable dans chaque chambre à deux lits, et des branchements partant de l'artère générale donnent la ventilation aux quatre promenoirs ou parloirs, dans chacun desquels se trouvent deux poêles par lesquels entre l'air neuf. L'air entre dans les salles avec une très faible vitesse, et l'on a observé qu'il s'y distribue plus régulièrement et plus uniformément que quand la ventilation est faite par appel.

L'air s'en va de chaque salle par 19 gaines, dont une se trouve dans la chambre à deux lits; toutes sont pratiquées dans l'épaisseur des murs, et chacune débouche dans la salle par deux orifices, l'un situé près du

parquet pour l'hiver, et l'autre a environ 2 mètres au-dessus pour l'été. Les gaines de tous les étages aboutissent au grenier, dans deux caniveaux établis dans les bas côtés de la toiture. Comme chacun de ces caniveaux communique par un coffre posé sous le versant du toit à la cheminée d'évacuation placée au centre du pavillon, il en résulte que le grenier reste libre; propriété que conservent également les caves, puisqu'elles ne contiennent ni foyers ni appareils à surveiller.

En été, la vapeur qui s'est détendue dans la machine circule dans la conduite principale, de laquelle partent des branchements qui chauffent les fourneaux d'office et les bains de chaque étage. Le surplus de cette vapeur non employée ainsi, ou aux bains de vapeur, est envoyé aux deux grands réservoirs des bains ordinaires, situés à la hauteur du premier, l'un à côté de la chaudière, et l'autre en regard de l'autre côté de l'hôpital. Toute la vapeur qu'emploie la marche de la machine, tant pour ventiler que pour élever l'eau et alimenter les générateurs, est absorbée de cette manière pendant l'été; de telle sorte que la force nécessaire pour la ventilation s'obtient pour ainsi dire gratuitement, aussi bien en été qu'en hiver.

On a observé qu'en été la température de l'air pris au clocher est au moins de 4° plus faible que celle de l'air ambiant à l'ombre, et que dans la même saison la température des salles ventilées par insufflation est inférieure d'à peu près ce même nombre de degrés à celle des salles ventilées par appel. Les volumes d'air que Thomas et Laurens ont reconnus utiles pour obtenir une ventilation bien salubre dans un hôpital vont à 80 mètres cubes, 100 mètres cubes et plus par malade et par heure. Les salles de chirurgie sont celles qui exigent le plus grand volume; il convient parfois de l'y porter à 120 mètres cubes. Ces quantités d'air observées, qui entrent réellement dans les salles en se répartissant dans toutes les parties, y produisent la ventilation utile qu'il est possible de réaliser. Le programme du concours dressé par l'administration ne demandait que 20 mètres cubes d'air par malade et par heure, avec faculté de doubler momentanément cette quantité, seconde condition qui n'est réalisable qu'en opérant par insufflation, à l'aide d'une machine dont on peut faire varier la puissance.

Grassi a constaté, pendant l'hiver 1854-55, des températures bien supérieures à 15°, puisqu'on y voit généralement figurer celles de 18° et 19°. Ces excédents de température demandés par le service médical ont lieu la nuit comme le jour et exigent une plus grande consommation de combustible.

Les quatre promenoirs reçoivent ensemble 2 069 mètres cubes d'air par heure et le volume d'air entrant dans les salles par lit et par heure est en moyenne de 118 mètres cubes pour les trois pavillons, cette moyenne ne descendant qu'à 113 mètres cubes pour une salle et ne montant qu'à 126 mètres cubes pour une autre. La répartition entre les diverses salles a été faite volontairement avec une certaine inégalité, pour donner plus d'air aux salles de chirurgie et à celles renfermant certains malades; on peut à volonté changer cette répartition.

L'air de ventilation parcourt dans l'axe de chaque salle, sous le plancher, un canal sur lequel les poêles sont placés. Au niveau du parquet, ce canal est couvert par des plaques de fonte dont les joints laissent toujours pénétrer dans les salles une certaine quantité d'air qui n'arrive pas aux poêles, mais que les volumes précédents comprennent. L'état hygrométrique de l'air dans les salles est maintenu à 1/2 par une injection de vapeur dans les tuyaux de conduite. Une particularité de la ventilation par pulsion, c'est que l'ouverture d'un certain nombre de fenêtres n'influe pas défavorablement sur le débit dans la salle, et ne modifie que peu la répartition de l'air.

A Lariboisière, la ventilation insufflée marche jour et nuit avec la même intensité; de plus, elle fonctionne aussi énergiquement en toute saison. Au contraire, la ventilation par appel n'est pas astreinte à cette permanence de l'autre côté de l'hôpital.

D'après le projet, le chauffage des salles devait se faire par des poêles à eau chaude du système Grouvelle; ces poêles, chauffés à la vapeur, devaient fournir toute la surface rayonnante. A l'exécution, Thomas et Laurens, qui craignaient les inconvénients de l'eau chaude et la difficulté qu'elle présente à faire varier promptement le chauffage, firent agir directement la vapeur.

Le caniveau qui parcourt l'axe de chaque salle, sous le parquet, et qui contient l'air de ventilation, renferme aussi un tuyau de vapeur et son tuyau de retour d'eau; ce caniveau fut recouvert dans toute sa longueur par des plaques de fonte, que ces tuyaux échauffent. A leur passage sous les poêles, les tuyaux de vapeur et de retour d'eau envoient un branchement à chaque poêle; mais chaque poêle étant muni de deux robinets, il est facile d'y supprimer tout passage de vapeur.

Les poêles ne servent ainsi au chauffage que dans le cas où la température devenant exceptionnellement assez rigoureuse, le chauffage à la vapeur du caniveau central ne suffit plus. Pendant les jours les plus froids, il suffit en général de donner de la vapeur au premier poêle, placé à proximité de la porte d'entrée du côté du vestibule. L'air de ventilation se chauffe au contact des tuyaux dans le caniveau, et il entre dans la salle en traversant les poêles. L'eau de ceux-ci est ainsi chauffée par l'air de ventilation, dont elle régularise la température, qui est de 30 à 35° à la sortie des poêles. Les poêles sont bien moins encombrants que ne le sont ceux usités dans les chauffages à eau chaude, à cause de la forme méplate et peu élevée qu'on leur a donnée. Ils sont en tôle et fonte, et traversés dans toute leur hauteur par 12 tuyaux droits de $0^m,12$ de diamètre que parcourt l'air de ventilation; il n'y a aucun serpentin de vapeur, celle-ci afflue simplement dans le soubassement en fonte. Chacun des quatre promenoirs contient deux poêles semblables à ceux des salles.

La vapeur qui sort de la machine ne suffit pas en hiver au chauffage des salles, puisque les autres chauffages que l'été exige subsistent toujours. Alors on y joint de la vapeur prise directement sur les générateurs. Cette addition s'opère dans l'artère générale de vapeur, au moyen

d'une buse qui fait un jet dans la direction du courant établi. Un robinet règle la pression initiale de cette vapeur additionnelle, de manière à ne pas augmenter la contre-pression derrière le piston. C'est ainsi toujours de la vapeur à basse pression que contiennent les appareils qui se trouvent dans les salles.

A Lariboisière, on évalue à 18° la température moyenne en hiver dans les salles de la ventilation insufflée, où le service médical a la faculté de chauffer autant qu'il le veut; il y a même des moments où l'on a davantage. En présence de l'augmentation de dépense qui résulte du chauffage à 18°, au moins dans le système de la ventilation insufflée, on est conduit à se demander pourquoi l'on ne chauffait souvent qu'à 14 ou 15° avec l'autre système; c'est que la température doit augmenter à mesure que la ventilation devient plus active, que l'évaporation cutanée est plus forte; avec le premier système les médecins font chauffer au degré le plus convenable pour les malades, tandis qu'avec le second l'entrepreneur se tient à la limite inférieure, malgré les plaintes des médecins et des malades. Si le chauffage à l'eau était à la disposition du médecin, comme l'est celui à la vapeur, il occasionnerait au moins la même dépense, quoique produisant une ventilation moins efficace.

738. Chauffage et ventilation des ateliers de taillerie et de cristallerie de Baccarat, par Thomas et Laurens. Les ateliers se composent d'un corps de bâtiment de 150 mètres de longueur, qui, à une de ses extrémités, se prolonge par une aile en retour d'équerre ayant même hauteur et même largeur, et une longueur de 45 mètres; les dispositions ont été prises comme s'il se fût agi d'un seul corps de bâtiment de 200 mètres de longueur. Le rez-de-chaussée et le premier étage sont occupés par deux files de tours à tailler les cristaux, mis en mouvement par deux turbines d'une force collective de 60 chevaux. Ces ateliers contiennent 544 ouvriers. Le taillage se faisant à l'eau, l'atmosphère est toujours saturée, ce qui exige une ventilation active et un chauffage plus dispendieux.

Les travaux de ventilation et de chauffage ont été établis en même temps et combinés ensemble. Le chauffage s'effectue à l'aide de vapeur à 4 ou 5 atmosphères, et la ventilation à l'aide de 2 ventilateurs à force centrifuge. Un des ventilateurs, mis en mouvement par une turbine, est placé dans le grenier, et il refoule dans les salles de travail de l'air pur puisé à la hauteur des toits; une conduite générale de vent, en planches de sapin bien jointives, est établie sur le plancher de grenier, et des tuyaux, aussi en bois, descendent de distance en distance pour porter l'air neuf aux diverses salles. En hiver, cet air est préalablement échauffé à 30°, par son passage dans une chambre que traverse un faisceau de 15 tuyaux de vapeur ayant $0^m,135$ de diamètre et 2 mètres de longueur.

Les orifices d'arrivée de l'air neuf sont placés dans l'axe des salles, à 10 mètres environ les uns des autres, et à 1 mètre au-dessus du plancher. Les salles n'ayant que $8^m,30$ de largeur, l'air se trouve suffisam-

ment bien réparti. L'air vicié s'échappe des salles sans aucune cheminée d'appel, simplement par les joints des fenêtres qu'on a soin de ménager à cet effet. On ne ressent aucun courant incommode.

Le second ventilateur est appliqué à une seconde turbine, et il fait le service de l'autre moitié des ateliers.

Les ventilateurs ont $1^m,20$ de diamètre et une largeur de $0^m,28$; ils font 300 tours par minute; la pression du vent dans les répartiteurs qui aboutissent aux ventouses n'est que de 3 à 4 millimètres d'*alcool*. Le volume de vent insufflé s'élève à environ 12 mètres cubes par ouvrier et par heure, ce qui est suffisant à cause de la bonne répartition de l'air dans l'atelier.

Le chauffage est produit par des tuyaux de vapeur en fonte qui circulent sous les établis des ouvriers; ils enlèvent ainsi l'humidité accumulée dans ces établis et permettent aux ouvriers d'avoir les pieds chauds.

Avec la ventilation indiquée, il est indispensable, soit d'émettre de la chaleur dans les ateliers, soit, de préférence, d'élever la température de l'air insufflé, à des époques de l'année et à des heures de la journée pour lesquelles la température extérieure semblerait devoir rendre tout chauffage inutile. On explique ce fait, qui est une cause d'excès de dépense, par l'efficacité de la ventilation jointe à l'humidité répandue dans les ateliers. Si l'air neuf n'arrive pas dans les salles à une température d'au moins 22 à 25°, les salles se refroidissent rapidement; d'où résulte la nécessité de chauffer l'air de ventilation la majeure partie de l'année, au moins le matin.

739. Chauffage et ventilation du nouvel Hôtel de ville de Paris. Nous donnons ci-près le mémoire dressé par MM. Geneste et Herscher, à l'appui de leur projet de chauffage et de ventilation du nouvel Hôtel de ville de Paris. Ce projet a été exécuté depuis, dans ses grandes lignes :

« *Choix du système de chauffage. Avantages du système de chauffage par la vapeur.* Parmi les moyens dont on dispose pour le chauffage d'un local de grande étendue, il en est trois principaux : le chauffage à air chaud, le chauffage à eau chaude, le chauffage à vapeur.

« Enfin, on peut concevoir un quatrième *système mixte,* qui consiste à chauffer les locaux par des surfaces d'eau chaude chauffées elles-mêmes indirectement par la vapeur.

« Nous sommes amenés à reconnaître, si l'on compare la quantité ou le poids de chacun des trois corps : air, eau ou vapeur, qui est nécessaire pour transporter une unité de chaleur ou calorie : que si l'on emploie de l'air, il faut environ 100 et 150 grammes pour transporter une calorie, tandis qu'il ne faut que 15 à 20 grammes d'eau et seulement 2 à 3 grammes de vapeur. On peut donc, *a priori,* établir : que le chauffage à air chaud ne se prête pas aux transmissions de chaleur à grandes distances, et que par conséquent le chauffage par l'air chaud de l'Hôtel de ville nécessiterait un grand nombre d'appareils répartis sur toute la surface du bâtiment, ce qui entraînerait un service encombrant, coûteux et compliqué. Le chauffage par l'air chaud nécessite, en outre, pour chacune des pièces,

un conduit spécial de grande section prenant l'air au calorifère et le conduisant aux locaux à chauffer.

« Or, il résulte de l'examen des plans de l'Hôtel de ville qu'il faudrait plusieurs centaines de ces conduits établis dans toute la hauteur de la construction, et que la disposition même des locaux fait que les étages supérieurs sont plus divisés que les étages inférieurs. Il en résulte l'impossibilité d'établir les conduits à air chaud.

« Les systèmes de chauffage à eau chaude et vapeur permettent, au contraire, de transporter facilement la chaleur aux différents locaux; mais nous reconnaissons que le chauffage à eau chaude présente des inconvénients qui le rendent, dans le cas actuel, inférieur au chauffage à vapeur. En effet, la grande quantité de chaleur latente contenue dans la vapeur d'eau fait que la condensation d'une petite quantité de vapeur permet un échauffement d'air considérable, et qu'il faut des surfaces de transmission de chaleur beaucoup moins grandes que celles nécessitées par le chauffage à eau chaude (1).

« Ainsi, en tenant compte de toutes les déperditions, on doit admettre que les surfaces chauffantes transmettent par la vapeur deux fois plus de calories que les mêmes surfaces n'en transmettent par l'eau chaude. Il en résulte un avantage tant au point de vue de l'économie de l'installation qu'à celui de la diminution d'encombrement résultant de la réduction des surfaces de transmission.

« Les chances de fuites dont on n'est jamais à l'abri avec l'emploi de l'eau chaude, en raison de la pression inévitable qui existe dans les conduites, par suite de la hauteur d'eau même provenant du chauffage, sont complètement évitées par l'emploi raisonné de la vapeur. Dans un chauffage bien étudié, en effet, l'eau de condensation ne devant pas séjourner dans les tuyaux, il en résulte, à l'arrêt du chauffage, une sécurité complète au sujet des fuites.

« L'inconvénient de la gelée, pendant l'arrêt du chauffage, qui est tant à craindre avec les systèmes à eau chaude, est pour le même fait absolument évité. Le chauffage à la vapeur est celui qui se prête le mieux à un réglage parfait.

« La faculté de conduire la vapeur à grande distance fait que l'on peut, des chaudières mêmes, régler les différentes parties du chauffage. Chacun des appareils de chauffe peut en outre se régler isolément des locaux chauffés, sans nuire en quoi que ce soit au chauffage général. Cette faculté de réglage à volonté du chauffage procure une économie de combustible importante sur le chauffage par transmission d'eau chaude, dont l'action régulière se prête moins aux modifications brusques.

« On a cherché à éviter les inconvénients du chauffage à eau chaude en lui substituant un système *mixte* où l'eau est chauffée par un serpentin de vapeur.

« Il y a avantage à éviter des transmissions calorifiques qui se traduisent toujours par une perte; il convient donc économiquement de

(1) Voir à ce sujet la note placée à la suite de ce mémoire, p. 936.

faire agir les appareils chauffants aussi directement que possible sur les espaces à chauffer. D'autre part, l'eau contenue dans les poêles à surface de chauffe présente des inconvénients de différentes natures. D'abord, par leurs dispositions mêmes, ces poêles exigent des précautions spéciales dont la non-observance occasionnerait de graves accidents. Si les poêles sont entièrement clos, ils nécessitent la précaution de ne les remplir d'eau que jusqu'à une certaine hauteur, remplissage qui se fait isolément pour chaque poêle. La simple dilatation du liquide par l'échauffement suffirait, dans le cas où cette précaution ne serait pas prise, pour provoquer une rupture. Un poêle contenant de l'eau, qui subit des variations continuelles de température, n'est jamais à l'abri des fuites. Si faibles qu'elles puissent être, ces fuites font peu à peu descendre le niveau de l'eau sans que rien le fasse connaître, et il arrive que le serpentin de vapeur qui traverse le poêle ne plonge plus dans le liquide et que la condensation se trouve graduellement réduite dans la proportion de 20 à 1. Le chauffage cesse alors peu à peu à mesure que le niveau baisse.

« Il y a donc là exigence d'une surveillance constante et un système vicieux en principe.

« Le chauffage à vapeur est donc celui que nous avons cru devoir employer pour l'Hôtel de ville de Paris. Il permet d'établir, à proximité des locaux à chauffer, des surfaces dans lesquelles la vapeur, venant à se condenser, chauffe l'air qui est introduit dans les divers locaux. En réalité, le chauffage a lieu par l'air chaud, mais cet air est chauffé par de la vapeur.

« Nous avons été amenés à perfectionner les appareils servant à l'emploi de la vapeur. Les appareils de chauffage par la vapeur peuvent se diviser en trois groupes :

« 1° *Appareils de production de vapeur*. Ce qu'il faut avant tout dans les appareils de production de vapeur destinés au chauffage, c'est d'éviter tous dangers d'accidents, quelque minimes qu'ils soient, rendre la surveillance simple, multiplier les appareils de sûreté et éviter tous les inconvénients de surveillance périodique; les appareils étudiés pour l'Hôtel de ville présentent une sécurité absolue.

« 2° *Canalisation et répartition de la vapeur*. Dans une installation de chauffage à vapeur un peu étendu, la question de canalisation prend une importance considérable. Il faut en outre se préoccuper de l'étanchéité des conduites, assurer leur durée en évitant les inconvénients qui se produisent fréquemment dans les canalisations de vapeur. C'est à quoi servent les appareils de détente et de purge qui sont construits par la maison Geneste et Herscher. Il faut se préoccuper également de la dilatation et enfin éviter les claquements d'eau dans les tuyaux et les détériorations qui en résultent. Quelle que soit la disposition spéciale d'une canalisation, les tuyaux de vapeur peuvent être en fer, en fonte ou en cuivre. Les tuyaux en fonte à brides avec joints en caoutchouc, les tuyaux en fer avec manchons taraudés et contre-écrous, les tuyaux

en cuivre avec raccords taraudés ou joints à bride avec bague intérieure, conviennent parfaitement suivant les cas.

« 3° *Appareils de chauffage proprement dits ou surfaces de condensation.* Quel que soit le type de tuyaux convenant à une canalisation donnée, c'est cet établissement rationnel de la canalisation d'ensemble, combiné avec l'emploi des appareils spéciaux, qui permet de résoudre toutes les difficultés propres à l'emploi de la vapeur.

« Les surfaces de chauffe apparentes peuvent affecter diverses formes et être construites avec divers matériaux. La surface de chauffe avec la vapeur a l'avantage de chauffer rapidement et de modifier et d'activer son action proportionnellement aux exigences de la température extérieure, exigences constamment variables sous notre climat. Cette souplesse d'action convient surtout aux services intermittents.

« *Choix du système de ventilation.* Les systèmes de ventilation applicables aux grands édifices peuvent se diviser en deux catégories : ventilation par insufflation; ventilation par appel.

« En principe, il faut enlever l'air vicié là où il se produit, et introduire l'air pur de façon à n'amener aucune gêne ni aucun courant d'air nuisible à l'intérieur des locaux.

« Si l'on examine les faits comparatifs produits par une bouche soufflant de l'air et une autre l'aspirant à la même vitesse, on constate que la première bouche produit un courant d'air sensible à une distance notable de la bouche, tandis que le courant produit par la seconde est à peine appréciable sur la bouche même. Nous concluons qu'on doit répartir, sur toute la surface ventilée, des bouches d'aspiration d'air aussi près que possible, soit de la partie habitée, soit des appareils d'éclairage qui sont une cause de viciation.

« Il ne suffit pas d'enlever l'air vicié, il faut encore, et surtout, que le mouvement inévitable de l'air qu'on est obligé de produire se fasse sans trouble et quelles que soient les conditions accidentelles des locaux.

« Or, la ventilation par appel, employée seule, produit à l'intérieur des salles ventilées une dépression qui, quoique minime, n'en suffit pas moins pour déterminer un mouvement rapide d'air affluant de l'extérieur par toutes les ouvertures normales ou accidentelles; une porte ouverte, une fissure de fenêtre deviennent autant de bouches d'insufflation dont l'effet nuisible se fait sentir à grande distance.

« La ventilation par appel doit être doublée d'une ventilation par insufflation, amenant à grande distance des parties habitées, par des orifices ménagés à cet effet, *de l'air préparé*, c'est-à-dire chaud en hiver, froid en été, et dont le volume doit être réglé de façon à établir dans les pièces une *surpression* très minime, suffisante pour empêcher toute entrée d'air non préparé venant de l'extérieur.

« Tous les locaux n'ont pas les mêmes exigences. S'il convient dans un salon d'établir la surpression, il faut, dans les cuisines, les écuries, les cabinets d'aisances, les offices et salles à manger, établir une dépression, afin que les odeurs qui y sont produites ne puissent se ré-

pandre dans les autres parties de l'édifice. A ce point de vue, l'étude de la répartition générale de l'air est indépendante de celle des appareils qui doivent le mettre en mouvement.

« Étant donné que la ventilation par insufflation est nécessaire dans la majorité des locaux, il faut recourir à des moyens mécaniques de mise en mouvement d'air; la force mécanique est d'ailleurs, dans l'espèce, facile et économique à produire au moyen des générateurs chargés de fournir la vapeur nécessaire au chauffage.

« Les constructeurs ont donné la préférence à des hélices mues par la vapeur, vu le rendement de ces appareils. Toutefois, lorsque la ventilation naturelle peut être rationnellement employée, l'avantage économique qui en résulte doit primer toute autre considération.

« Les appareils d'éclairage peuvent être employés au point de vue de l'aération, notamment pour les locaux nécessitant une ventilation de nuit.

« *Division des locaux en cinq services.* Quelques-uns des services de l'Hôtel de ville, tels que celui du conseil municipal, celui des fêtes, n'exigent qu'un fonctionnement intermittent, tandis que d'autres demandent une action plus continue. On a donc réuni les divers locaux, suivant leurs exigences, en cinq grandes divisions :

« 1° Service du conseil municipal; 2° service du préfet; 3° service des bureaux; 4° service des emprunts et tirages; 5° service des fêtes.

« La production de vapeur nécessaire a lieu dans la partie centrale du bâtiment, au moyen de générateurs placés dans les sous-sols et alimentant des prises de vapeur répondant aux différents services. Les générateurs donnent une puissance suffisante pour qu'on n'ait jamais besoin de leur demander un service simultané, alors même que tous les services de l'Hôtel de ville fonctionneraient en même temps, ce qui n'arrivera jamais. Cet excès de puissance a pour but de permettre le nettoyage périodique et les réparations, et de n'avoir, en aucun cas, à redouter une interruption dans le service.

« *Service du conseil municipal.* — Le service du conseil municipal comprend la grande salle du conseil avec ses dépendances : vestiaire, buvette, etc., les salles des commissions et des bureaux. La partie importante consiste dans le chauffage et la ventilation de la grande salle des séances.

« La destination de la salle ne permet pas l'établissement de surfaces de chauffe apparentes; ces surfaces seront établies au dehors et fonctionneront comme calorifères envoyant de l'air chaud :

« 1° Par des bouches réparties au pourtour de la salle, au niveau du sol;

« 2° Par des ouvertures ménagées en contre-haut à une distance suffisante pour éviter aux personnes l'action directe des courants entrants. Les bouches placées au niveau du sol sont spécialement destinées à établir le régime ou la température voulue, avant que la salle soit occupée; alors, on ralentit considérablement ou même on arrête le débit de ces bouches qui pourraient incommoder les personnes placées à proximité, et l'on fait arriver l'air chaud par les bouches supérieures, tandis que l'aspiration de l'air vicié est produite à la partie inférieure, à travers des ouvertures ménagées sous les gradins.

« La température d'arrivée de l'air pur est toujours réglable à volonté; dans tous les cas elle ne doit pas dépasser 35°.

« Les appareils de ventilation seront établis de telle façon qu'il y aura toujours une

petite surpression d'air dans la salle, pour éviter tous les courants d'air gênants de l'extérieur.

« Les divers autres services du conseil municipal seront chauffés et ventilés par des surfaces de chauffe apparentes et par des prises d'air spéciales.

« *Service du préfet.* — Le service du préfet comprend : au rez-de-chaussée, le grand escalier, les services secondaires, les écuries; à l'entresol, les bureaux et appartements particuliers; enfin, au premier étage, des salons de réception, le cabinet du préfet et la grande salle à manger.

« *Salons du préfet.* En admettant 4 personnes par mètre carré, ce qui semble le maximum de l'agglomération, on a compté sur un renouvellement de 30 mètres cubes par heure et par personne. Cet air doit être aspiré près du sol, et l'air chaud sera d'abord introduit par des bouches également placées au niveau du sol, au commencement du chauffage, pour obtenir le plus rapidement possible, avant l'arrivée des invités, le degré de température convenable; ensuite, cet air chaud est introduit par les ouvertures placées dans le haut. Bien que la majeure partie de l'air vicié doive être aspirée près du sol, cependant, pour donner issue aux gaz viciés provenant des appareils d'éclairage, il est bon de ménager, à la partie haute, une évacuation d'air que des expériences faites à l'ancien Hôtel de ville de Paris ont conduit à désigner comme devant représenter 1/4 du cube total de la ventilation. L'air introduit mécaniquement établit dans les pièces une surpression très faible, mais suffisante pour éviter tout courant d'air. Les entrées d'air doivent être disposées de façon à être aussi éloignées que possible du courant ascendant gazeux produit par les appareils d'éclairage, afin d'éviter tout mélange d'air pur avec les gaz viciés.

« Les *dégagements, couloirs, escaliers* seront chauffés par le sol à une température supérieure à celle des salons. Avant la réception, le chauffage aura lieu, à la façon habituelle, par de l'air à une température suffisante pour combattre les déperditions.

« A mesure que les salons s'emplissent, chaque individu amenant une source nouvelle de chaleur, la température de l'air introduit devra être progressivement diminuée, et si l'on veut maintenir une température constante, il faudra, au bout d'un certain temps, introduire de l'air à une température inférieure à celle du milieu où on l'introduit. Les surfaces de chauffe placées au-dessus du plafond sont alimentées par de la vapeur dont l'émission peut être réglée à volonté. L'air vicié des grands salons du premier étage s'évacue par des bouches placées près du sol, le long des murs, de façon à n'amener aucune gêne, et va rejoindre les cours intérieures où un appel est produit.

« *Salle à manger.* Les mêmes dispositions ont été adoptées pour la grande salle à manger. L'air chaud à température réglable est introduit, soit au niveau du sol, soit en contre-haut; l'air vicié est aspiré pour les 3/4 par le sol et pour 1/4 par la partie haute, afin de permettre l'évacuation des gaz provenant des appareils d'éclairage.

« *Cabinets d'aisances, écuries, cuisines.* Tous les locaux pouvant produire une odeur quelconque doivent être ventilés par appel. Les cabinets d'aisances seront largement pourvus d'air et communiqueront à un conduit d'aspiration énergique. L'air sera mis en mouvement, pendant le jour, par les moyens généraux, tandis que la nuit les appareils d'éclairage suffiront à assurer une ventilation convenable.

« Dans les écuries, les gaz viciés qui s'y produisent par la présence du fumier sont plus lourds que l'air : il faut donc les aspirer près du sol, et l'on peut établir une bouche d'aspiration au-dessous des mangeoires près du sol. Cette bouche d'aspiration doit pouvoir enlever 200 mètres cubes par heure. En temps ordinaire, l'air extérieur peut être introduit directement à l'extrémité opposée, dans la partie haute; mais, dans certains cas, alors que la température extérieure est très basse, il y aurait inconvénient à introduire de l'air pouvant amener une transition brusque de température. Dans ce cas, au moyen d'un dispositif spécial, on mélange l'air introduit avec une partie plus ou moins grande de l'air de l'écurie, afin d'atténuer l'effet d'une température trop froide, tout en maintenant le bénéfice d'une large aération.

« Pendant le jour, le mouvement d'air sera obtenu dans les cheminées par appel mécanique, et pendant la nuit par les appareils d'éclairage.

« *Service des bureaux.* Dans aucun des locaux l'agglomération n'est assez grande pour motiver l'emploi de moyens énergiques de ventilation. Pour les couloirs, galeries,

escaliers, on ne s'est pas préoccupé du renouvellement d'air, qui est toujours fourni en quantité plus que suffisante par les ouvertures ou communications permanentes.

« Les poêles placés dans chaque bureau portent un robinet ou bouton de réglage qui permet d'activer ou de ralentir l'introduction de vapeur et par conséquent de faire varier en plus ou en moins le chauffage.

« *Service des emprunts et tirages.* Il comprend une grande salle au rez-de-chaussée, communiquant avec les bureaux, une salle en sous-sol et la salle Saint-Jean.

« *Salle du public et bureaux.* 8 grandes surfaces de chauffe apparentes et une introduction d'air chaud par des ouvertures ménagées près de la charpente en fer, assurent le chauffage et la ventilation dans des conditions satisfaisantes. Les bureaux, communiquant avec cette salle, seront eux-mêmes chauffés par insufflation, avec une surpression minimo mais suffisante pour empêcher l'air de la salle de rentrer dans les bureaux. L'évacuation de l'air vicié se fera, partie par des ouvertures au niveau du sol, partie par des ouvertures ménagées dans le plafond vitré; ces dernières plus spécialement affectées au service d'été.

« *Salle du sous-sol.* Elle sera abondamment ventilée et chauffée à la partie haute et par 20 surfaces de chauffe directes formant la base des colonnes qui portent le plafond. L'air vicié sortira par des orifices établis le long du mur extérieur et donnant dans un caniveau commun.

« *Salle Saint-Jean.* Elle sera chauffée et ventilée; l'air pur, traversant des surfaces de chauffe placées dans la grande salle en sous-sol, est introduit par une série de bouches réparties uniformément de chaque côté de la salle. L'évacuation se fait, aux deux extrémités, par les escaliers descendant au sous-sol et qui servent de grandes gaines d'évacuation.

« *Service des fêtes.* Le service des fêtes comporte presque exclusivement l'ensemble des grands salons du premier étage; ils sont chauffés et ventilés comme les grands salons du préfet (p. 935).

« *Conclusion.* Le projet permet donc d'obtenir le chauffage et la ventilation d'un édifice présentant des services et des exigences aussi complexes que l'Hôtel de ville de Paris, au moyen d'un seul groupe de foyers; la surveillance des appareils est des plus simples.

« Dans le cas d'un service maximum, la dépense de combustible spéciale à chacun des cinq services, est :

« Pour le conseil municipal	de	76	kilog. de houille	par heure.
« Pour le préfet	de	260	—	—
« Pour les bureaux.	de	338	—	—
« Pour les emprunts et tirages	de	181	—	—
« Pour les fêtes.	de	390	—	— »

— MM. Geneste et Herscher, adoptant les idées exprimées par M. Émile Trélat, dans un rapport adressé au conseil municipal, affirment dans le mémoire précédent (p. 930) que la vapeur est le véhicule qui exige le moindre *poids mort* pour transporter à distance une quantité déterminée de chaleur. M. Trélat dit en effet : « On ne connaît que trois *véhicules* de chaleur utilisables dans les applications urbaines : l'AIR, l'EAU et la VAPEUR. Comme la voiture ou le wagon de chemin de fer qui ajoute nécessairement un poids mort à la charge utile transportée, chacun de ces véhicules de chaleur pèse d'un poids mort spécial sur le transport des *calories* qui lui ont été confiées. »

Suivent quelques calculs aboutissant au résultat suivant : dans les conditions où l'on opère pratiquement, il faut pour transporter une calorie ou unité de chaleur :

Poids d'air	133 gr.
Poids d'eau.	20 gr.
Poids de vapeur.	1gr,81

D'où il conclut que la vapeur est le *véhicule par excellence de la chaleur,* que les appareils à vapeur prennent 60 fois moins de place que ceux que l'air nécessite, qu'ils sont 75 fois moins lourds que les appareils à eau, etc.

M. P. Planat a combattu cette opinion, en 1877, dans la *Semaine des constructeurs*, dans les termes suivants :

« Chauffer un certain espace, cela veut dire qu'il faut y transporter, en un temps donné, une *certaine quantité d'air* à une température déterminée. Un cube de 1000 mètres par exemple pris à 10° et dont on porte la température à 40°, c'est-à-dire 1000 mètres cubes qu'on aura échauffés au préalable de 30° : c'est l'hypothèse de M. Trélat.

« Supposons, en premier lieu, un chauffage à air chaud : il faut commencer par échauffer l'air, c'est-à-dire les 1000 mètres cubes, et la dépense nécessaire pour cet échauffement est de 9750 calories. Mais, en outre, pour amener cet air à la place où il est nécessaire, il faut le transporter du dehors à l'intérieur ; c'est ce qui introduit cette considération de poids mort dont il était question tout à l'heure. Admettons que le trajet soit, par exemple, de 30 mètres ; de ce chef, on aura à effectuer — en dehors de tout frottement — une dépense de 39000 kilogrammètres ou, ce qui revient au même, de 92 calories ; c'est finalement une dépense accessoire de chaleur équivalente à moins de *un centième* de celle qu'exige le chauffage proprement dit. Il vaudrait tout autant n'en pas parler, car il y a d'autres pertes accessoires par le frottement, les refroidissements, etc., qui ont une importance autrement considérable que celle-ci.

« Si, au lieu de calorifères à air, on employait la vapeur, la dépense pour transporter cette vapeur à la même distance ne serait que de 2 calories au lieu de 92, et c'est la différence de 90 calories sur près de 10000 qui constituerait en tout le bénéfice de la vapeur. Mais il ne faut pas croire que, pour avoir chauffé et transporté de la vapeur, on ait terminé l'opération du chauffage ; en fin de compte, il faut toujours en venir à *chauffer l'air* lui-même ; il faudra donc, après avoir conduit la vapeur aux appareils de chauffage, amener à ceux-ci l'air nécessaire, du comble ou de la cave, tout comme dans le premier cas, et la dépense de transport sera sensiblement la même.

« Dans le chauffage à vapeur, on n'a donc fait autre chose qu'introduire un intermédiaire, commode, très avantageux à beaucoup d'autres points de vue, mais qui grève l'opération de la charge qu'amène forcément tout intermédiaire. On chauffe la vapeur pour qu'elle cède sa chaleur à l'air, ce qui entraîne une certaine perte ; on transporte de l'air, en volume égal à celui du premier cas, mais de plus on transporte la vapeur. L'avantage théorique, qui ne vaut vraiment pas la peine d'être considéré, serait en tout cas au système direct, et non au procédé avec intermédiaire. En outre on a, dans ce dernier cas, à parer aux déperditions par les frottements et par le refroidissement, qui incombent à l'intermédiaire. Enfin, dans le chauffage à l'air chaud, on n'a généralement pas besoin de recourir à des moyens mécaniques pour introduire l'air frais ; avec le système à vapeur, il faut ordinairement faire appel à des ventilateurs, à des hélices marchant à l'air comprimé, nouveaux intermédiaires qui exigent une nouvelle dépense.

« Les véritables arguments qui militent en faveur du chauffage à vapeur sont : salubrité de l'air qui n'est mis en contact qu'avec des parois dont la température ne dépasse pas 100° ; possibilité de transporter la chaleur à de grandes distances ; grande facilité de régler à volonté les diverses parties de l'ensemble, de porter plus de chaleur sur certains points, moins sur d'autres ; de faire, en outre, sur un même point, varier la chaleur suivant les heures, suivant les besoins. Avec le chauffage à air, on est en quelque sorte esclave d'un appareil qui fonctionne comme il l'entend et non comme nous voulons, suivant des lois que nous ne commandons pas. L'insufflation de l'air frais, accompagnant le chauffage à vapeur, nous rend tout à fait maîtres de la ventilation, — introduction et évacuation. »

HYGROMÉTRIE

740. L'état hygrométrique de l'air ou humidité relative est le rapport de la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air à la quantité qui s'y trouverait s'il était entièrement saturé à la même température ; ce rapport est aussi celui des tensions de la vapeur d'eau (voir le tableau, p. 938).

Tableau du rapport de la tension de la vapeur d'eau correspondant aux différents degrés de l'hygromètre, à la tension de la vapeur saturée, la température étant de 10°, d'après les expériences de Gay-Lussac, et du poids de vapeur contenu, aux différents degrés de l'hygromètre, dans un mètre cube d'air à la température de 15°.

DEGRÉS de l'hygromètre.	RAPPORT des tensions.	POIDS de vapeur à 15°.	DEGRÉS de l'hygromètre.	RAPPORT des tensions.	POIDS de vapeur à 15°.	DEGRÉS de l'hygromètre.	RAPPORT des tensions.	POIDS de vapeur à 15°.
		gramm.			gramm.			gramm.
0	0,0000	0,000	34	0,1710	2,178	68	0,4489	5,719
1	0,0045	0,057	35	0,1768	2,252	69	0,4604	5,865
2	0,0090	0,115	36	0,1830	2,331	70	0,4719	6,012
3	0,0135	0,172	37	0,1892	2,410	71	0,4851	6,180
4	0,0180	0,229	38	0,1954	2,489	72	0,4982	6,347
5	0,0225	0,287	39	0,2016	2,568	73	0,5114	6,515
6	0,0271	0,345	40	0,2078	2,647	74	0,5245	6,682
7	0,0318	0,405	41	0,2145	2,733	75	0,5376	6,848
8	0,0364	0,464	42	0,2212	2,818	76	0,5525	7,038
9	0,0410	0,522	43	0,2279	2,903	77	0,5674	7,228
10	0,0457	0,582	44	0,2346	2,989	78	0,5824	7,419
11	0,0505	0,643	45	0,2413	3,074	79	0,5973	7,609
12	0,0552	0,703	46	0,2486	3,167	80	0,6122	7,799
13	0,0600	0,764	47	0,2559	3,260	81	0,6289	8,012
14	0,0648	0,825	48	0,2632	3,353	82	0,6457	8,226
15	0,0696	0,887	49	0,2706	3,447	83	0,6624	8,438
16	0,0746	0,950	50	0,2779	3,540	84	0,6792	8,652
17	0,0795	1,013	51	0,2858	3,641	85	0,6959	8,865
18	0,0845	1,076	52	0,2938	3,743	86	0,7149	9,107
19	0,0895	1,140	53	0,3017	3,843	87	0,7339	9,349
20	0,0945	1,204	54	0,3097	3,945	88	0,7529	9,591
21	0,0997	1,270	55	0,3176	4,046	89	0,7719	9,833
22	0,1049	1,336	56	0,3266	4,161	90	0,7909	10,075
23	0,1101	1,403	57	0,3357	4,276	91	0,8109	10,330
24	0,1153	1,469	58	0,3447	4,391	92	0,8308	10,583
25	0,1205	1,535	59	0,3537	4,506	93	0,8508	10,838
26	0,1259	1,604	60	0,3628	4,622	94	0,8707	11,092
27	0,1314	1,674	61	0,3731	4,753	95	0,8906	11,345
28	0,1369	1,744	62	0,3834	4,884	96	0,9125	11,624
29	0,1423	1,813	63	0,3936	5,014	97	0,9344	12,903
30	0,1478	1,883	64	0,4039	5,145	98	0,9563	12,182
31	0,1536	1,957	65	0,4142	5,276	99	0,9781	12,460
32	0,1594	2,031	66	0,4258	5,424	100	1,0000	12,739
33	0,1652	2,104	67	0,4373	5,584			

On donne le nom d'*hygromètres* aux instruments employés pour déterminer ce rapport. Le plus simple est celui de Saussure : il est fondé sur la propriété que possède un cheveu légèrement tendu de se raccourcir ou de s'allonger, selon qu'il est placé dans un air plus sec ou dans un air plus humide. Le 0 de l'instrument correspond à un air entièrement privé de vapeur, et le degré 100 à un air complètement saturé.

Gay-Lussac a déterminé par expérience les tensions de la vapeur correspondant aux différents degrés de l'hygromètre, pour l'air à la température de 10° et à la pression 0,76. Les rapports de ces tensions à la tension maximum de la vapeur sont consignés dans le tableau ci-dessus, à l'aide duquel on peut déterminer le poids de vapeur contenu dans un

mètre cube d'air saturé aux différents degrés de l'hygromètre, non seulement pour la température de 10°, mais aussi pour une température quelconque, qui ne diffère pas beaucoup toutefois de 10°, car il est très probable que les rapports entre les degrés de l'hygromètre et les tensions de la vapeur changent avec la température.

Soit, par exemple, à déterminer le poids de vapeur contenu dans un mètre cube d'air à la température habituelle de 15°, des lieux habités, l'hygromètre marquant 70 degrés. A 15°, 1 mètre cube de vapeur à son maximum de densité pesant 12gr,739 (page 646), le rapport de tensions indiqué par la table étant 0,4719, le poids cherché est $12,739 \times 0,4719 = 6^{gr},012$. C'est ainsi que nous avons calculé les poids du tableau (p. 938). La force élastique de la vapeur saturée à 15° étant 1cm,27 (page 646), à 70 degrés de l'hygromètre la tension de la vapeur est $1,27 \times 0,4719 = 0^{cm},599$.

Dans les couches inférieures de l'atmosphère, l'indication moyenne de l'hygromètre est 72° dans toutes les saisons, ce qui correspond, comme le montre le tableau, à de l'air saturé à la moitié du maximum; rarement l'hygromètre marque 100°, même quand il pleut; 40° est la limite de sécheresse près de la surface de la terre.

ÉTABLISSEMENTS INSALUBRES, DANGEREUX OU INCOMMODES

741. La dernière nomenclature de ces établissements date du décret du 3 mai 1886. Ce sont ceux qui, par leur proximité avec les habitations, répandent des odeurs malsaines, peuvent provoquer des incendies, altèrent les eaux ou provoquent un bruit incommode, etc.

La première classe comprend les établissements qui doivent être éloignés des habitations particulières; la seconde, ceux dont l'éloignement n'est pas rigoureusement nécessaire, mais qui ne sauraient être installés qu'après certaines conditions de nature à garantir le voisinage contre tout risque; la troisième classe comprend les établissements qui peuvent être installés dans le voisinage des habitations, mais qui sont soumis à une surveillance de la police.

Voici la nomenclature, par classes, des établissements insalubres, dangereux ou incommodes :

Première classe : *Abattoirs; Acide arsénique*, quand les produits nitreux ne sont pas absorbés; *Acide chlorhydrique*, non condensé; *Acide oxalique*, sans destruction des gaz nuisibles; *Acide picrique*, quand les gaz nuisibles ne sont pas brûlés; *Acide stéarique*, par distillation; *Acide sulfurique; Affinage de l'or et de l'argent par les acides; Aldéhyde; Allumettes chimiques; Amidon* par fermentation; *Amorces fulminantes; Arséniate de potasse* au moyen de salpêtre, quand les vapeurs ne sont pas absorbées; *Artifices; Bâches imperméables* avec cuisson des huiles; *Bains et boues provenant du dérochage des métaux*, traitement sans condensation des vapeurs; *Baryte caustique* par décomposition du nitrate, si les vapeurs ne sont ni condensées ni détruites; *Bleu d'outremer*, gaz condensés; *Dépôt de boues et d'immondices et voiries; Boyauderies; Carbonisation des matières animales; Celluloïd et produits nitrés analogues* (fabrication); *Cendres gravelées* (fumée au dehors); *Dépôt de chair, débris, issues* provenant de l'abatage des animaux; *Infirmeries de*

chiens; Traitement des chiffons par la vapeur de l'acide chlorhydrique non condensé; *Chlorures de soufre; Extraction des parties soyeuses des chrysalides; Coke* en plein air ou en fours non fumivores; *Colle forte; Collodion; Combustion de plantes marines; Cretons; Cuirs vernis; Cyanure de potassium* et *bleu de Prusse* par la calcination directe; *Dégras* ou *huiles épaisses; Extraction des huiles des eaux grasses* en vases ouverts; *Echaudoirs pour débris d'animaux; Encre d'imprimerie* avec cuisson d'huile à feu nu; *Dépôt d'engrais de vidanges* non préparé ou en magasin non couvert; *Fabrication d'engrais au moyen de matières animales; Équarrissage; Dépôt d'éther* (1 000 litres); *Fabrication de l'éther; Étoupilles; Feutres* et *visières vernis*; *Fulminate de mercure; Goudrons* et *brais végétaux; Graisses à feu nu; Traitement des graisses de cuisine; Graisses pour voitures; Grillage des minerais sulfureux; Dépôt de guano* (25000 kilog); *Huiles des pieds de bœuf* avec matières putréfiées; *Huiles de poisson; Huiles de résine; Corps gras extraits de matières animales; Mélange* ou *cuisson des huiles* en vases ouverts; *Huiles oxydées* avec cuisson; *Huiles rousses; Incinération des lies de vin* (fumée au dehors); *Incinération des lignites; Exploitation des marcs ou charrées de soude; Mèches pour mineurs* (100 kilog. de poudre); *Ménageries; Nitrate de méthyle; Nitrates métalliques*, vapeurs non condensées; *Noir d'ivoire* ou *noir animal*, gaz non brûlés; *Orseille*, en vases ouverts; *Torréfaction des os*, gaz non brûlés; *Dépôt en grand d'os frais; Dégraissage par des hydrocarbures; Phosphore; Poudres et matières fulminantes; Poudrette; Fonte et épuration des résines, galipots et arcansons; Rouge de Prusse et d'Angleterre; Rouissage du chanvre et du lin; Enfumage des sabots; Traitement du sang*; *Sel ammoniac et sulfate d'ammoniaque par les matières animales* (établissement principal); *Sinapismes*, avec distillation; *Soies de porc* préparées par fermentation; *Soudes brutes*, résidus; *Soudes brutes de varech*, établissements permanents; *Suif brun; Suif en branches*, à feu nu; *Suif d'os; Sulfate de cuivre*, par le grillage des pyrites; *Sulfate de mercure*, vapeurs non absorbées; *Sulfate de soude*, sans décomposition de l'acide chlorhydrique; *Sulfure de carbone* (fabrication ou emploi en grand); *Incinération des côtes du tabac; Taffetas et toiles vernis ou cirés; Grillage des terres pyriteuses et alumineuses; Carbonisation de la tourbe*, à vases ouverts; *Tourteaux d'olives* par le sulfure de carbone; *Triperies*, annexes des abattoirs; *Vernis gras.*

Deuxième classe : *Acide arsénique* par acides arsénieux ou azotiques absorbés; *Acide chlorhydrique* par acides condensés; *Acide fluorhydrique; Acide lactique; Acide oxalique* par sciure de bois et potasse; *Acide pyroligneux*, quand les produits gazeux ne sont pas brûlés; *Acide pyroligneux*, purification; *Acide salicylique*, au moyen de l'acide phénique; *Acide stéarique* par saponification; *Agglomérés* ou *briquettes de houille* au brai gras; *Alcool*, rectification; *Alizarine artificielle* au moyen de l'anthracite; *Allumettes chimiques*, dépôt au-dessus de 25 mètres cubes; *Amidonnerie* par séparation du gluten et sans fermentation; *Amorces fulminantes; Argenture des glaces*, avec application de vernis aux hydrocarbures; *Arséniate de potasse*, quand les vapeurs sont absorbées; *Asphaltes et bitumes* à feu nu; *Bâches imperméables* sans cuisson des huiles; *Bains et boues* provenant du dérochage des métaux, si les vapeurs sont condensées; *Baryte caustique* par décomposition du nitrate, si les vapeurs sont condensées ou détruites; *Baryte* au moyen de l'acide chlorhydrique, à vases ouverts; *Battage des tapis* en grand; *Blanchiment* des fils et toiles par le chlore, des fils et tissus de laine et de soie par l'acide sulfureux; *Bleu d'outremer*, lorsque les gaz sont condensés; *Boyaux salés; Briqueteries flamandes; Calorigène* et mélange de ce genre; *Carbonisation du bois* à l'air autre part qu'en forêt; *Application des enduits du caoutchouc; Travail du caoutchouc; Celluloïd et produits nitrés* analogues; *Cendres gravelées* avec combustion ou condensation des fumées; *Chamoiseries; Chapeaux* préparés au moyen d'un vernis; *Chaudronnerie et serrurerie*, dans les villes de 2000 âmes et au-dessus, ayant plus de 20 ouvriers; *Fours à chaux* permanents; *Chlore; Chlorure de chaux*, en grand; *Chlorures alcalins*, eau de Javelle; *Fours à ciment* permanents; *Traitement des frisons de cocons; Coke* en fours fumivores; *Aplatissement des cornes et sabots; Corroieries; Crayons de graphite; Cuirs verts et peaux fraiches; Cyanure de potassium et bleu de Prusse* par l'emploi de matières préalablement carbonisées en vases clos; *Déchets de filatures de lin, de chanvre et de jute; Eaux grasses* en vases clos;

Encres d'imprimerie sans cuisson d'huile à feu nu; *Engrais* au moyen des matières provenant de vidanges ou débris d'animaux, desséchés ou désinfectés et en magasin ouvert, quand la quantité excède 25000 kilog.; *Éther*, si la quantité supérieure à 100 litres n'atteint pas 1000 litres; *Faïences* avec fours non fumivores; *Feutre goudronné; Forge et chaudronnerie* employant des marteaux mécaniques; *Hauts fourneaux; Galons et tissus d'or et d'argent; Gaz d'éclairage; Glycérine* extraite des eaux de savonnerie ou de stéarinerie; *Goudrons et matières bitumineuses fluides; Goudrons* traités dans les usines à gaz où ils se produisent; *Gravure chimique* sur verre avec application de vernis aux hydrocarbures; *Huiles des pieds de bœuf* avec matières non putréfiées; *Huiles de ressence; Injection en grand des bois par huiles lourdes créosotées; Mélanges et cuisson des huiles* en vases clos; *Huiles oxydées* par exposition à l'air sans cuisson; *Laiteries en grand* dans les villes; *Lessives alcalines* des papeteries; *Lies de vin* avec combustion ou condensation des fumées; *Séchage des lies de vin; Dépôt de liquides pour l'éclairage* au moyen de l'alcool et des huiles essentielles; *Construction de machines et wagons; Mèches de sûreté* pour mineurs, quand la quantité manipulée ou conservée est inférieure à 100 kilog. de poudre ordinaire; *Miroirs métalliques et autres ateliers employant des moutons; Séchage des morues; Murexide* en vases clos par la réaction de l'acide azotique et de l'acide urique du guano; *Nitrates métalliques,* si les vapeurs sont condensées; *Nitrobenzine*, *aniline*, etc.; *Noir de fumée; Revivification du noir d'ivoire et noir animal*, lorsque les gaz sont brûlés; *Dessiccation des oignons* dans les villes; *Torréfaction des os,* lorsque les os sont brûlés; *Pâte à papier* au moyen de la paille et autres matières combustibles; *Planage et séchage des peaux; Pipes à fumer* avec fours non fumivores; *Fabrication du platine; Fours à plâtre permanents; Poissons salés, Porcelaine* avec fours non fumivores; *Porcheries* comprenant plus de six animaux; *Potasse* par calcination des résidus de mélasse; *Protochlorure d'étain* ou *sels d'étain; Raffineries et fabriques de sucre; Réfrigération* par l'acide sulfureux; *Rogues; Rouissage* par l'action des acides; *Salaisons et saurages* de poissons; *Conserves de sardines,* dans les villes; *Saucissons; Sécrétage* des peaux ou poils de lièvre ou de lapin; *Sel ammoniac* et *sulfate d'ammoniaque* par l'emploi des matières animales; *Sel ammoniac et sulfate d'ammoniaque* extraits des eaux d'épuration du gaz; *Sinapismes* à l'aide des hydrocarbures, sans distillation; *Soufre; Suif en branches*, au bain-marie ou à la vapeur; *Sulfate de mercure,* quand les vapeurs sont absorbées; *Sulfate de peroxyde de fer* par le sulfate de protoxyde de fer et l'acide nitrique; *Sulfate de soude* par la décomposition du sel marin, avec condensation complète de l'acide chlorhydrique; *Sulfure d'arsenic* (vapeurs condensées); *Sulfure de sodium; Superphosphate de chaux et de potasse; Tabac; Incinération de la tannée humide; Tanneries; Teillage; Terres émaillées* avec fours non fumivores; *Toiles grasses*, *objets goudronnés ou bitumés* (travail à chaud); *Tonnellerie* (fûts imprégnés de matières grasses et putrescibles); *Torches résineuses; Tourbes* en vases clos; *Tuerie d'animaux; Tuiles métalliques; Vernis à l'esprit-de-vin; Séchage et gonflement des vessies nettoyées; Verreries, glaces,* etc., avec fours non fumivores.

Troisième classe : *Acide nitrique, acide oxalique,* avec destruction des gaz nuisibles; *Acide picrique,* avec destruction des gaz nuisibles; *Acide pyroligneux,* quand les produits gazeux sont brûlés; *Acier; Agglomérés* ou briquettes à brai sec; *Albumine* au moyen de sérum frais du sang; *Alcools* autres que de vin sans travail de rectification; *Alcools* (distilleries agricoles); *Allumettes chimiques* (dépôt de 5 à 25 mètres cubes); *Amidon grillé; Ammoniaque* par la décomposition des sels; *Dépôt d'asphaltes, bitumes,* etc., solides; *Battage, cardage et épuration des laines, crins et plumes de literie; Battage des cuirs* à l'aide de marteaux; *Battage et lavage des fils de laine et déchets de soie* dans les villes: *Batteurs d'or et d'argent; Battoirs et écorces; Betteraves* (dépôt de pulpes humides); *Blanc de zinc* par la combustion du métal; *Blanchiment des fils,* etc., par l'acide sulfureux; *Bocards à minerais ou à crasses; Moulage des bougies* d'origine minérale; *Bougies et autres objets en cire et en stéarine; Boules au glucose caramélisé; Boutonniers et autres emboutisseurs de métaux* par moyens mécaniques; *Brasseries; Briqueteries* avec fours non fumivores; *Buanderies; Torréfaction du café; Calcination des cailloux; Carbonisation du bois* en vases clos, avec combustion des produits gazeux; *Carton-*

niers; Celluloïd et produits nitrés analogues; Cendres d'orfèvre traitées par le plomb; *Céruse* ou *blanc de plomb; Chandelles; Chantiers de bois à brûler*, dans les villes; *Chapeaux de feutre; Charbon de bois*, dans les villes; *Chaudronnerie et serrurerie*, dans les villes de 2000 âmes et au-dessus, ayant 8 à 20 ouvriers; *Fours à chaux* ne travaillant pas plus d'un mois par an; *Chicorée; Chiffons; Chiffons* traités par la vapeur de l'acide chlorhydrique condensé; *Chlorures de chaux* (ateliers fabriquant 300 kilog. par jour); *Choucroute; Chromate de potasse; Fours à ciment* ne travaillant qu'un mois par an; *Cire à cacheter; Cochenille ammoniacale; Aplatissement des cornes et sabots*, sans macération; *Blanchisserie des cotons; Cuivre* déroché par les acides; *Cyanure rouge de potassium* ou *prussiate rouge de potasse; Déchets de matières filamenteuses*, dans les villes; *Distilleries; Dorure et argenture sur métaux; Échaudoirs* animaux; *Email* sur métaux; *Emaux* avec fours non fumivores; *Engrais d'animaux* (quantité inférieure à 25000 kilog.); *Engraissement des volailles*, dans les villes; *Epaillage des laines et draps; Eponges; Etamage des glaces; Transformation en étoupes des cordages; Faïences* avec fours fumivores; *Fanons de baleine; Féculeries; Fer* (dérochage); *Fer* (galvanisation); *Fer-blanc; Filature des cocons; Fonderies de cuivre, laiton et bronze; Fonderie* en 2e fusion; *Fonte et laminage de plomb, zinc et cuivre; Fromages* (dépôts dans les villes); *Gaz d'éclairage* pour usage particulier; *Gazomètres* pour usage particulier; *Gélatines alimentaires* et gélatines provenant de peaux blanches et de peaux fraîches non tannées; *Glycérine; Graisses et suifs; Guano* (vente au détail); *Harengs* (saurage); *Hongroieries; Huileries* ou *moulins à huile; Épuration des huiles; Enfumage du lard; Lavoir à houille; Lavoir à laine; Lavoir à minerai; Litharge; Malteries; Maroquineries; Massicot; Matières colorantes* par l'aniline; *Mégisseries* (peaux délicates); *Minium; Miroirs métalliques* et ateliers où les marteaux ne pèsent pas 25 kilog. et n'ont pas 1 mètre de longueur de chute; *Moulins* à broyer le plâtre, la chaux, etc.; *Noir minéral* provenant des schistes bitumineux; *Olives confites; Orseille* à vases clos, par l'ammoniaque; *Dépôt d'os secs; Ouates; Papier; Parchemineries; Peaux de moutons* (séchage); *Lustrage et apprêtage des peaux; Dépôt de peaux salées non séchées; Dépôt de peaux sèches* conservées par produit odorant; *Perchlorure de fer* par la dissolution du peroxyde de fer; *Phosphates de chaux; Pilerie mécanique des drogues; Pipes à fumer* avec fours fumivores; *Fours à plâtre* ne travaillant qu'un mois par an; *Porcelaine* avec fours fumivores; *Poteries de terre* avec fours non fumivores; *Pouzzolane artificielle; Réfrigération* par ammoniaque, éther, etc.; *Salaison* des viandes; *Dépôt de salaisons*, dans les villes; *Savonneries; Scieries mécaniques; Sel de soude; Sirops* de fécule ou glucose; *Soies* de porcs sous fermentation; *Lustrage au soufre* des chapeaux; *Pulvérisation du soufre; Sulfate de fer, d'albumine et d'alun; Sulfate de protoxyde de fer* ou *couperose verte* par l'acide sulfurique; *Tabatières en carton; Tan; Teintureries; Terres émaillées* avec fours fumivores; *Travail à froid des toiles grasses*, etc., pour emballage; *Toiles peintes; Tôles et métaux vernis; Tréfileries; Tuileries* avec fours non fumivores; *Tuyaux de drainage; Vacheries; Verdet* ou vert-de-gris, au moyen de l'acide pyroligneux; *Verreries, glaces* avec fours fumivores.

FOYERS

742. Dimensions des différentes parties d'un foyer (*fig.* 160 et 161, n° 744). L'ouverture du cendrier doit être assez grande pour laisser passer l'air froid nécessaire à la combustion; elle doit être au moins égale à la section des carneaux ou de la cheminée à sa partie supérieure, et il convient, pour ne pas brûler de combustible inutilement, de la garnir d'une porte qu'on ferme pendant les heures de repos (542).

Les barreaux des grilles ont ordinairement de $0^m,03$ à $0^m,024$ de largeur, et ils sont espacés entre eux de $0^m,01$ à $0^m,008$; quelquefois cette

épaisseur est réduite à 0m,015, avec toujours 1/4 environ (0m,005) d'espace libre. La houille menue et les combustibles qui se divisent sur la grille exigent des intervalles très faibles entre les barreaux.

La somme des espaces libres compris entre les barreaux est à peu près égale à la section des carneaux ou de la cheminée à son sommet (542).

Les barreaux en fer sont rectangulaires et souvent carrés. Pour les foyers des fourneaux métallurgiques, destinés à produire de très hautes températures, les barreaux sont en fer, et on leur donne 0m,03 de hauteur. L'air qui arrive s'échauffe fortement entre les barreaux, en même temps qu'il les refroidit.

Les barreaux en fonte sont ceux que l'on emploie le plus souvent. Ils sont plus larges en haut qu'en bas, afin que malgré leur plus grande hauteur, qui atteint 0m,08 à 0m,10 au milieu pour des barreaux de 1 mètre de longueur, la grille ne s'encrasse pas. Les barreaux ayant de 0m,08 à 0m,10 de hauteur au milieu n'ont que 0m,05 à 0m,06 aux extrémités. Des petites saillies latérales venues aux extrémités des barreaux, ainsi qu'au milieu quand ils sont longs, en maintiennent l'écartement. On laisse à l'extrémité des barreaux, mis en place, un certain jeu, afin qu'ils puissent se dilater librement. Quelquefois même on fait en biseau leur extrémité antérieure, afin qu'en se dilatant ils tendent à s'élever au lieu de pousser contre la plaque de fonte qui éloigne la grille de la porte.

Lorsque les barreaux sont longs et d'une faible épaisseur de 0m,015, il est bon de les fondre par couple, afin d'en augmenter la résistance.

Les barreaux reposent à chaque extrémité sur un sommier en fer carré posé transversalement, et dont les extrémités pénètrent dans la maçonnerie du fourneau.

La surface des grilles est de 1 décimètre carré pour 1 kilog. ou 1k,2 de houille à brûler par heure; cependant on va à 1k,5 et même 2 kilog. sans que l'effet en soit sensiblement diminué. Pour quelques grilles, cette consommation a été réduite jusqu'à 0k,3; mais alors il faut que le tirage à travers la grille soit faible, comme, par exemple, sous les chaudières en plomb. D'après quelques résultats obtenus, on peut admettre que les grandes grilles sont favorables à l'effet produit par le combustible, mais il est plus difficile d'en obtenir un feu d'une intensité uniforme; c'est ce qui fait que les ingénieurs, d'abord partisans des grandes grilles, reviennent aux grilles brûlant de 1 kilog. à 1k,2 par décimètre carré (749). Pour les chaudières de navires, cette consommation varie de 0k,5 à 0k,6, et elle atteint 0k,8 à 1 kilog. quand le tirage est forcé.

On peut admettre moyennement que pour la houille menue ou un combustible gras qui s'empâte, il faut une faible épaisseur sur la grille, et que la consommation est de 0k,4 à 0k,6 par décimètre carré; que pour le tout-venant et la gaillette, traversés plus facilement par l'air, on brûle de 0k,8 à 1 kilog. pour la houille demi-grasse, et de 1k,2 à 1k,3 pour la houille sèche (521, 527).

L'épaisseur de houille sur la grille varie de 0m,05 à 0m,08, et s'élève jusqu'à 0m,12, suivant qu'elle est plus ou moins menue. Pour les houilles

demi-grasses, cette épaisseur est de 0^m,15, et de 0^m,20 pour les houilles sèches. Pour les chaudières de navires, l'épaisseur de houille sur la grille varie de 0^m,10 à 0^m,14. Pour le coke, dont la consommation par heure varie de 2 à 3 kilog. par décimètre carré de surface de grille, l'épaisseur de la couche de combustible sur la grille varie de 0^m,20 à 0^m,30. Dans les locomotives, où le tirage est très grand, chaque décimètre carré de surface de grille brûle environ 4^k,30 de coke par heure. Pour le bois, la tourbe et la tannée en mottes, la surface de grille est de 3 décimètres carrés par 10 kilog. de combustible à brûler par heure.

Pour que le chauffeur puisse facilement gouverner son feu, la largeur de la porte ne devant pas dépasser 0^m,40 à 0^m,45 au plus, la largeur de la grille ne doit pas être supérieure à 1 mètre, et sa longueur à 2 mètres; ce qui fait un maximum de surface de 2 mètres carrés. Si une consommation de combustible exige une plus grande surface, on a recours à plusieurs foyers. En plan, la grille forme un rectangle, que l'on raccorde par un trapèze avec l'ouverture de la porte.

Pour la houille menue, la distance entre la grille et la chaudière ou les bouilleurs varie de 0^m,30 à 0^m,35, et elle atteint 0^m,40 pour les très grands foyers; pour les houilles sèches, cette distance est de 0^m,50; pour la houille en gaillette à chaude et longue flamme, elle varie de 0^m,40 à 0^m,50; pour la tourbe, elle est de 0^m,50 à 0^m,55; pour le coke, 0^m,60, et pour le bois, de 0^m,60 à 0^m,75.

Les grilles sont ordinairement horizontales; mais on les incline quelquefois de 1/8 à 1/6 de l'avant vers l'arrière, ce qui est utile pour les combustibles qui dégagent beaucoup de flamme.

Les portes de foyers ont de 0^m,22 à 0^m,35 de hauteur, de 0^m,25 à 0^m,30 habituellement, et de 0^m,35 à 0^m,40 de largeur; elles doivent être aussi petites que possible, sans que le chargement et le tisonnage de la grille cessent d'être faciles. On les fait en fonte, et, selon leur largeur, elles sont à un ou à deux vantaux; elles doivent être ajustées avec soin, afin de diminuer les rentrées d'air. Pour que la porte n'atteigne pas une température trop élevée, suivant les dimensions du foyer, on l'espace de 0^m,25 à 0^m,40 du devant de la grille, de 0^m,30 à 0^m,35 ordinairement, et pour diminuer encore le rayonnement, souvent on dispose une plaque de tôle que des entretoises maintiennent parallèlement à quelques centimètres de la face intérieure de la porte.

Quelquefois aussi la porte est garnie intérieurement d'un cadre rempli de terre à brique. Cette disposition, qui est très bonne pour diminuer la perte de chaleur, est surtout utile pour les grands foyers, parce qu'elle permet de réduire la distance de la grille à la porte.

Pour la facilité du chargement, il convient que le seuil de la porte soit à 0^m,75 ou 0^m,80 au-dessus du sol.

La porte du foyer et celle du cendrier sont montées avec solidité sur une devanture de fonte fixée solidement contre la face du fourneau, par des boulons dont la longue tige est scellée dans le massif de maçonnerie.

En plaçant sur le sol du cendrier une cuvette en fonte remplie d'eau,

il en résulte plusieurs avantages : 1° les escarbilles s'éteignent immédiatement, sans brûler inutilement, et l'on peut les utiliser plus tard; 2° la grille n'est plus exposée au rayonnement des escarbilles et se conserve mieux; 3° pour un combustible maigre, l'eau qui se vaporise se décompose en traversant le charbon incandescent, et l'hydrogène qui en résulte produit de la flamme; l'eau ainsi placée sous la grille forme miroir et permet au chauffeur de voir comment marche son feu sans ouvrir la porte du foyer.

La porte du cendrier doit être fermée avec soin lorsqu'on interrompt le travail. Si un chauffeur prend cette précaution le soir, et qu'en outre il ferme également bien le registre de la cheminée, la chaleur se conserve pendant la nuit, au point que la pression étant de 5 atmosphères le soir dans la chaudière, elle peut être encore de 4^{atm},5 le matin.

743. Foyers fumivores. Le combustible placé sur la grille doit être complètement brûlé, c'est-à-dire transformé en acide carbonique, et cela avec le moins d'oxygène possible. Ce résultat est très important, tant sous le rapport de l'économie du combustible que sous celui de la suppression de cette fumée épaisse que produit un foyer mal gouverné, et qui est si incommode, surtout dans les grands centres de population. On a essayé un grand nombre de dispositions de foyers fumivores, dont quelques-uns ont donné des résultats assez satisfaisants; mais tant que l'expérience n'aura pas prononcé d'une manière définitive, qu'on n'oublie pas qu'un chauffeur, en le chargeant convenablement et à propos, peut rendre à peu près fumivore un foyer ordinaire; c'est ce qui résulte de l'instruction suivante, rédigée par le conseil d'hygiène et de salubrité du département de la Seine.

Moyens d'empêcher la production de la fumée et d'en opérer la combustion. Depuis la promulgation de l'ordonnance de police du 11 novembre 1854, rendue sur l'avis du conseil d'hygiène publique et de salubrité, et portant que, dans un délai de six mois, les propriétaires d'usines où l'on fait usage d'appareils à vapeur seront tenus de brûler la fumée produite par les fourneaux de ces appareils ou de les alimenter avec des combustibles qui ne donnent pas plus de fumée que le coke ou le bois, plusieurs usiniers, auxquels ladite ordonnance est applicable, se sont adressés à l'administration pour lui demander l'indication des moyens à employer afin de satisfaire à ses prescriptions. Quelques-uns d'entre eux ajoutent qu'ils ont fait, à diverses époques, des tentatives pour brûler la fumée et n'en ont obtenu que des résultats incomplets ou nuls. D'un autre côté, plusieurs personnes ont appelé l'attention du préfet de police sur des procédés ou appareils fumivores pour lesquels elles sollicitaient son approbation. Les procédés ainsi indiqués et les applications qu'on en a faites ont été l'objet de l'examen du conseil d'hygiène publique et de salubrité. Les nouvelles observations qu'il a recueillies l'ont confirmé dans l'opinion qu'il était possible de prévenir, au moyen de dispositions judicieuses et de soins convenables donnés à la conduite du foyer, l'émission de fumée par les fourneaux alimentés avec de la houille.

L'administration n'a point à prescrire ni à recommander certains appareils ou procédés fumivores. D'ailleurs, les moyens de prévenir ou de brûler la fumée sont nombreux; ils doivent être modifiés non seulement dans les dimensions, mais dans les parties essentielles des appareils qu'ils comportent, suivant les fourneaux auxquels on les applique.

L'origine de la fumée est dans les produits volatils qui se dégagent abondamment de la plupart des combustibles, tels que les diverses variétés de houille, la tourbe, le bois, lorsqu'ils sont exposés soudainement à une température élevée. Ces produits sont

en majeure partie des carbures d'hydrogène, qui sont eux-mêmes très combustibles. Mais, pour qu'ils s'enflamment, deux conditions sont nécessaires : 1° leur mélange avec l'air en proportion convenable; 2° une haute température de ce mélange. Si ces deux conditions ne sont pas réalisées dans le foyer lui-même, ou dans les conduits que parcourent les produits gazeux de la combustion, les carbures d'hydrogène subissent une décomposition dont le résultat est un dépôt abondant de suie ou de charbon en particules ténues qui sont entraînées dans le courant de gaz sortant par l'orifice de la cheminée. Lorsqu'on jette sur une grille, actuellement couverte de coke incandescent, une quantité de houille assez considérable pour la couvrir presque en totalité d'une couche de 20 à 25 centimètres d'épaisseur, les parties de houille fraîche qui se trouvent en contact avec le coke subissent une distillation rapide; la température de l'intérieur du foyer baisse subitement, en même temps que le passage de l'air à travers la grille et la charge de combustible se trouve obstrué. Aucune des deux conditions nécessaires pour l'inflammation des carbures d'hydrogène n'est réalisée; aussi voit-on des torrents d'une fumée opaque sortir par la cheminée. L'introduction de l'air, dans de telles circonstances, par la porte du foyer ou par toute autre ouverture débouchant directement au-dessus du chargement de houille, reste sans effet, parce que la température est insuffisante pour l'inflammation des produits gazeux. La fumée décroît graduellement d'intensité, à mesure que la houille se convertit en coke, par le dégagement des parties volatiles; que l'air trouve un accès plus libre à travers le combustible aggloméré en morceaux laissant entre eux d'assez larges intervalles, et que la température s'élève de nouveau, par l'effet de la combustion. Si, avant que la distillation ne soit complète, on agite avec un ringard le mélange de houille et de coke déposé sur la grille, on amène des portions de houille non encore carbonisée au contact des fragments de coke les plus chauds, la distillation devient plus rapide et il y a une recrudescence de fumée.

Les foyers dont les grilles ont assez d'étendue pour que les charges de combustible ne les recouvrent qu'en partie et en couche de faible épaisseur, donnent peu de fumée, surtout si la houille y est chargée par petites quantités à la fois, et si le chauffeur a la précaution de déposer la charge sur la partie antérieure de la grille, de telle sorte que les produits gazeux de la distillation arrivent aux carneaux en passant sur la surface du coke embrasé qui recouvre la partie postérieure, et laisse toujours un passage suffisant à l'entrée de l'air. La production de fumée est considérablement accrue par les dimensions trop petites des grilles, eu égard à la quantité de combustible qui doit être brûlée dans un temps donné, et par une mauvaise conduite du foyer de la part des chauffeurs qui chargent à de trop longs intervalles et par trop grandes quantités à la fois. Elle est d'autant plus abondante, toutes choses égales d'ailleurs, que l'on fait usage de combustibles contenant plus de parties volatiles, et, pour ne parler que de la houille, de variétés *plus grasses et plus collantes*. Les houilles sèches de quelques mines du département du Nord et des environs de Charleroi, en Belgique, ne donnent que peu de fumée dans des foyers passablement construits et alimentés avec quelque soin. Le coke n'en donne point du tout; il ne s'écoule, par l'orifice de la cheminée des foyers alimentés avec ce combustible, que des gaz incolores entraînant quelques cendres ou poussières extrêmement ténues.

Tous les appareils fumivores ont pour but de réaliser les deux conditions que nous avons indiquées comme nécessaires pour opérer l'inflammation et la combustion complète, dans le fourneau, des carbures d'hydrogène résultant de la distillation du combustible (1).

Les uns comportent des appareils mécaniques mis en jeu par la machine à vapeur employée dans l'établissement, et qui ont pour objet de distribuer le combustible sur la grille, soit d'une manière continue, soit par petites portions à la fois, à des intervalles de temps réguliers et courts. Tels sont les distributeurs mécaniques et les grilles mobiles qui sont généralement désignés par les noms de leurs inventeurs.

D'autres comportent seulement des appareils fixes ou mus à la main par le chauffeur; ils sont destinés à mesurer les charges de combustible que l'on introduit dans le foyer, sans donner accès, par l'ouverture de la porte, à un grand volume d'air qui occasion-

(1) On trouvera des détails sur cette matière dans divers recueils, particulièrement dans le Bulletin de mars 1855 de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale.

nerait un refroidissement nuisible. Ils sont, le plus souvent, combinés avec des dispositions particulières du foyer et des ouvertures ménagées dans les portes ou les parois et munis de registres qui sont ouverts, après chaque chargement, pour admettre l'air nécessaire à la combustion des produits de la distillation. Quelques-uns sont disposés de manière que le combustible frais soit amené dans le foyer en dessous du combustible déjà carbonisé, à l'inverse de ce qui a lieu dans les fourneaux ordinaires, où le combustible frais est jeté à la pelle sur le coke dont la grille est couverte. L'air arrive sur la houille à l'endroit où elle commence à distiller, de sorte que les produits volatils combustibles s'enflamment au moment même où ils prennent naissance.

Un grand nombre d'appareils comportent deux ou plusieurs foyers qui doivent être chargés alternativement; des jeux de registres convenablement disposés et que le chauffeur manœuvre au moment opportun, forcent les produits fumeux du foyer récemment chargé à passer dans celui qui contient du combustible déjà carbonisé, quelquefois même à traverser la grille de ce foyer et le coke embrasé qui la couvre. L'air arrivant d'ailleurs en quantité suffisante soit entre les barreaux de cette grille, soit, au besoin, par des ouvreaux particuliers, les produits gazeux émanés du premier foyer s'enflamment et sont brûlés complètement dans le second.

D'autres procédés comportent seulement des fourneaux et des grilles de formes spéciales, par exemple des grilles inclinées et disposées en marches d'escalier, et des ouvreaux, pourvus de registres, par lesquels l'air extérieur est admis au milieu des produits gazeux de la combustion soit d'une manière continue, soit par intervalles.

On a essayé d'éviter la fumée au moyen d'un courant d'air forcé qu'un ventilateur lance sous la grille, ou qui est simplement déterminé par un filet de vapeur venant de la chaudière, et que l'on fait jaillir dans l'axe d'un tuyau cylindrique ouvert à ses deux extrémités, dont une débouche dans l'atmosphère et l'autre dans le cendrier.

On a appliqué au chauffage des chaudières à vapeur et autres foyers industriels la combustion du gaz oxyde de carbone qui se dégage abondamment par les gueulards des hauts fourneaux à fondre les minerais, alimentés au charbon de bois ou au coke. On se procure même l'oxyde de carbone mêlé à d'autres produits gazeux inflammables en traitant, dans des appareils spéciaux, des combustibles de toute nature, et principalement ceux de qualité inférieure, tels que des poussiers de halle à charbon, des houilles terreuses, de la tourbe, etc. Ces gaz sont amenés dans les foyers où l'on veut les utiliser, en même temps que de l'air atmosphérique en proportion convenable. Le mélange, une fois allumé, continue à brûler sans émission de fumée (592).

Enfin, on a soumis les gaz fumeux qui émanent d'un ou plusieurs fourneaux, à une sorte de lavage qui les dépouille des particules de charbon et des poussières dont ils sont chargés. A cet effet, on les fait passer dans une galerie, sur une couche d'eau qui en occupe la partie inférieure. Un appareil approprié relève incessamment l'eau, pour la laisser retomber en pluie ou la lancer en gouttelettes au milieu du courant gazeux. On obtient ainsi un dépôt de noir de fumée que l'on retire, de temps à autre, de la galerie de condensation.

Il n'est aucun des procédés ci-dessus qui n'ait été déjà appliqué pour prévenir ou supprimer la fumée, et qui n'ait donné des résultats satisfaisants, sous ce rapport, lorsqu'il a été adapté à des foyers bien disposés, confiés à des chauffeurs attentifs et un peu intelligents. On a cité un grand nombre d'insuccès, mais ils sont imputables à un défaut d'harmonie entre les appareils et les foyers auxquels on a voulu les appliquer, ou bien à la négligence des chauffeurs, des contremaîtres et propriétaires d'usines, et, le plus souvent, à ce que l'on a voulu forcer la production de vapeur, en dépassant les limites en vue desquelles les appareils avaient été établis.

Dans les cas où, par suite des dimensions trop petites de la grille ou de toute autre circonstance, aucun moyen de prévenir l'émission de la fumée ne serait applicable, l'emploi des combustibles fumeux devrait être remplacé par l'usage exclusif du coke.

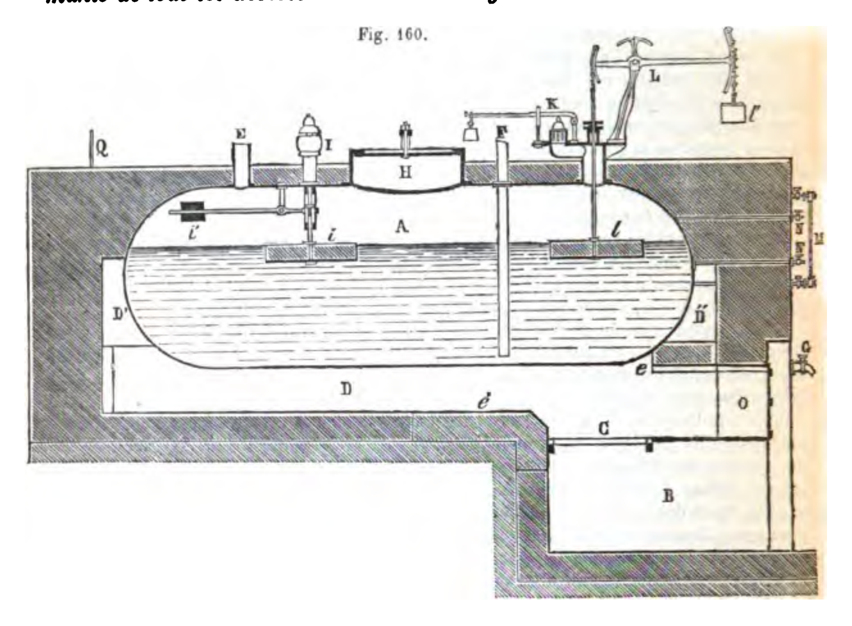
GÉNÉRATEURS OU CHAUDIÈRES A VAPEUR

744. Un générateur de vapeur est un appareil qui a pour objet de produire de la vapeur d'eau sous une pression plus ou moins grande,

cette vapeur pouvant être utilisée pour chauffage et divers services industriels, ou bien pour produire un travail mécanique en activant une machine à vapeur.

La figure 160 représente, à l'échelle de 1/30, *la coupe par l'axe d'un fourneau et d'une chaudière à vapeur ancien modèle, sans bouilleur, munie de tous les accessoires dont elle est garnie.*

Fig. 160.



A chaudière. Au lieu de terminer la chaudière par des demi-sphères formées par 7 ou 8 morceaux emboutis et rivés ensemble, on la termine par des calottes sphériques, d'un rayon double de celui de la chaudière et formées d'une seule feuille de tôle emboutie se raccordant par des congés avec le corps de la chaudière ;

B cendrier (742) ;

C grille (742) ;

D, D' D'' carneaux. La fumée, en quittant la grille, suit le fond de la chaudière dans D ; elle s'élève en D', revient sur le devant du fourneau par un côté de la chaudière; puis elle tourne en D'' pour regagner le derrière du fourneau en suivant l'autre côté de la chaudière ; enfin un canal la conduit à la cheminée. La section des carneaux est ordinairement égale à celle de la cheminée à sa partie supérieure (542, 742) ;

E tuyau de prise de vapeur. L'eau entraînée mécaniquement par la vapeur est ordinairement de 5 à 10 p. 100, et elle peut atteindre 30, 40, et jusqu'à 50 p. 100, quand la prise de vapeur est mal disposée et se fait par intermittences brusques. On réduit la quantité d'eau entraînée en éloignant le plus possible la prise de vapeur de la surface de l'eau dans la chaudière, ou encore en faisant aboutir le tuyau E à un tube percé d'un grand nombre de petits trous et placé longitudinalement dans la chambre de vapeur;

F tuyau d'alimentation de la chaudière. Ce tuyau se termine à la partie supérieure par une bride, et porte latéralement deux tuyaux munis chacun d'un robinet. L'un de ces tuyaux amène l'eau d'alimentation, et l'autre sert à vider la chaudière quand elle est encore sous pression. Il vaut mieux que l'eau d'alimentation

pénètre dans la chaudière par des petits trous percés latéralement à la partie inférieure du tuyau F que par le bout de ce tuyau laissé tout ouvert; on évite ainsi un jet d'eau froide qui se précipite sur la tôle et la détériore. L'eau, en s'échauffant dans le tuyau F, y dépose les sels les moins solubles qu'elle contient; c'est en soulevant la bride qui ferme ce tuyau à sa partie supérieure qu'on enlève facilement les incrustations qui s'y sont formées;

G robinet de vidange de la chaudière. Comme ce robinet s'engorge très facilement par les incrustations, et que les joints sont en outre très difficiles à faire à la partie inférieure de la chaudière, où l'on n'aborde qu'avec peine, il est préférable de vider la chaudière quand elle est encore sous pression; la vapeur force l'eau à remonter par le tuyau F, d'où elle s'échappe par le tuyau latéral de vidange;

H *trou d'homme*, à fermeture autoclave formée par une plaque de fonte; il permet d'entrer dans la chaudière pour la nettoyer;

I sifflet d'alarme;

i flotteur du sifflet d'alarme;

i' contrepoids de ce flotteur;

K soupape de sûreté chargée par l'intermédiaire d'un levier. Chaque chaudière doit être garnie de deux soupapes de sûreté semblables;

L indicateur à flotteur *l*, et à contrepoids *l'*, du niveau de l'eau dans la chaudière;

M tube en verre placé au-devant du fourneau, et indiquant le niveau de l'eau dans la chaudière;

N, N' robinets indicateurs du niveau; l'un doit toujours donner de l'eau, et l'autre de la vapeur;

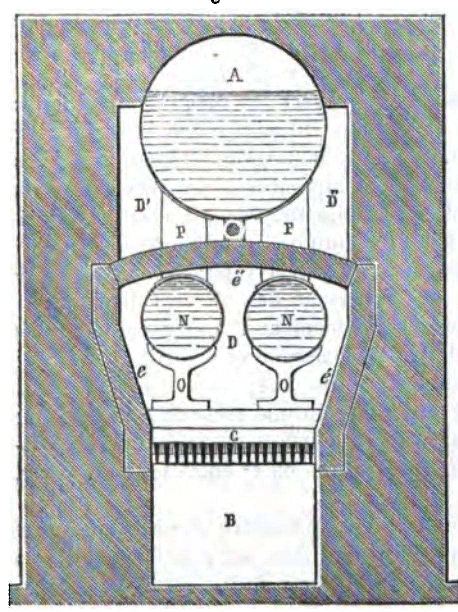
O embrasure en fonte formant l'ouverture du foyer, et sur laquelle se fixe et s'applique la porte;

Q tige servant à manœuvrer le registre qui règle le tirage, en permettant de fermer plus ou moins le canal qui conduit la fumée à la cheminée;

e, *e'* parties en briques réfractaires.

745. Chaudière à deux bouilleurs (voir p. 956). La figure 161 est, à l'échelle de 1/40, *la coupe transversale d'un fourneau et d'une chaudière à bouilleurs.*

Fig. 161.



A chaudière;

B cendrier;

C grille;

D, D', D'' carneaux. La fumée va du foyer à l'autre extrémité de la chaudière par D; elle revient au-devant de la chaudière par D', et elle s'en retourne derrière par D'', pour de là aller à la cheminée.

Quelquefois la murette en briques séparant les carneaux D', D'' est reportée d'une certaine quantité vers le carneau D'' afin d'augmenter la section du carneau D', dans lequel la fumée circule à une plus haute température, c'est-à-dire plus dilatée. La voûte séparative du carneau D de ceux D' et D'' étant à une certaine distance au-dessus des bouilleurs, chauffe fortement le dessus de ceux-ci par rayonnement, et il en résulte parfois des coups de

feu qui détruisent promptement les bouilleurs, dont la partie supérieure ne contient que de la vapeur. C'est pour éviter cet inconvénient que souvent cette voûte unique est remplacée par trois petites voûtes dont celle du milieu repose sur des sommiers en briques placés sur les bouilleurs, et les deux autres sur un de ces sommiers et le massif du fourneau. Quelquefois les voûtes sont remplacées simplement par une cloison horizontale en briques reposant sur les bouilleurs, qu'elles affleurent ou dépassent de quelques centimètres à la partie supérieure.

Les cloisons séparatives des carneaux ont $0^m,11$ d'épaisseur et souvent même $0^m,50$, l'épaisseur d'une brique. Les murailles des fourneaux, à l'endroit des carneaux, ont ordinairement $0^m,33$ d'épaisseur, et même plus pour les grands. La muraille du devant est percée d'un trou en face de chaque carneau pour en faciliter le nettoyage; ces trous se ferment par une murette en briques de champ qu'on enlève facilement;

e, e', e'', parties en briques réfractaires;

N, N bouilleurs;

P, P cuissards; ils établissent la communication entre la chaudière et les bouilleurs.

Il y a deux cuissards par bouilleur; leur diamètre est de $0^m,25$ pour les petites chaudières et de $0^m,35$ pour celles de 40 chevaux. Leur longueur est telle que la distance verticale entre le bas de la chaudière et le dessus des bouilleurs soit de $0^m,30$ ou $0^m,32$;

O, O chandeliers en fonte supportant la chaudière; celle-ci est en outre munie de fortes oreilles en fonte reposant sur la maçonnerie au-dessus du niveau supérieur des carneaux; il est bon d'interposer entre ces oreilles et la maçonnerie des barres de fer méplat de $0^m,40$ environ de longueur. Une chaudière de 6 mètres de longueur et de $1^m,10$ de diamètre porte, de chaque côté, trois oreilles de $0^m,20$ de largeur et de $0^m,35$ de saillie sur la chaudière.

Le fourneau se construit en briques avec revêtements réfractaires dans les parties exposées aux flammes.

La devanture du fourneau est ordinairement une plaque en fonte présentant des nervures qui lui donnent une grande solidité.

Il existe un grand nombre de types de générateurs de vapeur dont nous indiquerons les principaux après avoir exposé les quelques généralités qui conviennent à tous les générateurs (751).

746. Transmission de la chaleur à travers les plaques métalliques. Application aux générateurs de vapeur. On admet que la quantité de chaleur qui passe à travers une plaque homogène à faces parallèles, est proportionnelle à la différence des températures des deux faces de la plaque, et en raison inverse de son épaisseur. Péclet a cherché à vérifier cette loi par expérience, et il a reconnu que pour les plaques métalliques, chauffées d'un côté par l'eau ou par la vapeur et refroidies de l'autre par l'eau, l'influence de l'épaisseur des plaques disparaissait quand on ne renouvelait pas convenablement l'eau en contact avec leurs faces, mais que la loi relative à l'épaisseur se vérifiait quand l'eau était vivement agitée. Il a aussi reconnu que, l'eau étant vivement agitée, la quantité de chaleur qui passe en une seconde à travers une plaque de plomb de 1 mètre carré de surface et de $0^m,001$ d'épaisseur, pour une différence de température de 1° entre les deux faces, est de 3,84 unités.

D'après Clément, une plaque de cuivre de 1 mètre carré de surface et de 2 à 3 millimètres d'épaisseur, dont une face est chauffée par de la vapeur à 100° et dont l'autre est refroidie par de l'eau à 28°, condense

par heure 100 kilog. de vapeur; ce qui fait seulement 0,21 d'unité de chaleur qui passent à travers la plaque, par seconde et pour une différence de température de 1°. D'après Thomas et Laurens, au moyen d'un tuyau en cuivre d'un petit diamètre, on aurait condensé 400 kilog. de vapeur par mètre carré de surface de tuyau, par heure et pour une différence de température de 45°; ce qui ferait 1,36 unités (calories) qui passeraient à travers 1 mètre carré de surface de tuyau, par seconde, pour une différence de température de 1°. On doit sans doute attribuer l'excès de ce résultat sur celui de Clément à ce que l'air, étant chassé dans le tuyau, n'empêchait pas le contact de la vapeur avec les parois refroidissantes.

Lorsqu'on chauffe un liquide par un gaz, comme dans les chaudières à vapeur, ou un gaz par un autre, comme dans les calorifères, on peut, dans la pratique, négliger l'influence de l'épaisseur du métal.

747. Métaux employés à la fabrication des chaudières. Les anciennes chaudières étaient en fonte; aujourd'hui, on fait usage pour leur confection de la tôle et du cuivre rouge (436); on emploie la tôle, à cause de sa grande ténacité et de son prix modéré; pour les petits appareils, il est bon d'employer le cuivre, qui se courbe facilement sur un très petit rayon; il convient aussi de recourir au cuivre quand les eaux sont acides, comme dans les ardoisières. On fait aussi des chaudières en tôle d'acier (voir page 956).

D'après Tredgold et Clément Desormes, la fonte, la tôle rouillée et le cuivre noirci laissent passer à peu près la même quantité de chaleur dans le même temps, la fonte étant au premier rang et le cuivre au dernier; dans les chaudières à vapeur, la couche de suie tend encore à rendre égaux les effets de ces métaux.

La durée relative des chaudières est une considération très importante qui doit guider dans leur choix; mais cette durée, qui dépend des qualités de la matière dont la chaudière est fabriquée, de l'usage de la chaudière et la manière dont le feu est conduit, est tout à fait indéterminée; tout ce qu'on peut dire, c'est que, toutes choses égales d'ailleurs, les chaudières en cuivre ont une plus grande durée que les autres. Ce sont surtout le capital premier et son intérêt qui donnent l'avantage aux chaudières en tôle et en fonte sur celles en cuivre; on rejette les chaudières en fonte à cause de leur bris facile par un changement brusque de température.

748. Calcul du poids d'une chaudière. Multipliant la surface d'une chaudière ou d'un bouilleur en mètres carrés par son épaisseur en millimètres, on a le volume de la matière en décimètres cubes; augmentant ce volume de son dixième pour tenir compte des croisements de la tôle et des rivets, et multipliant le résultat obtenu par la densité 7,8 de la tôle, on a très approximativement le poids de la chaudière ou du bouilleur en kilogrammes. Le poids des accessoires, soupapes de sûreté, flotteurs, portes, grilles, plaques du fourneau, est environ le quart de la chaudière. Le poids des chaudières est, à épaisseur égale, sensiblement proportionnel à leur puissance.

749. Surface de chauffe des chaudières à vapeur. Volume d'eau contenu dans les chaudières. Volume de la chambre de vapeur. Un mètre carré de surface de chaudière, exposé à un très grand feu et entièrement plongé dans la flamme, produit 100 kilog. de vapeur à l'heure. Clément a obtenu les mêmes résultats pour une chaudière en cuivre de 3 millimètres d'épaisseur placée dans les mêmes circonstances.

On n'a pas d'expériences bien concluantes sur la puissanee de vaporisation de la surface en contact avec les carneaux. Les chaudières ordinaires les mieux établies, c'est-à-dire celles qui produisent de 6 à 7 kilog. de vapeur par kilog. de houille, avec dégagement de fumée à 300°, ne produisent en une heure que de 15 à 30 kilog. de vapeur par mètre carré de surface de chauffe totale. Des constructeurs adoptent quelquefois 25 kilog.; mais il vaut mieux déterminer la surface de chauffe en ne comptant que sur une production de 20 kilog. au maximum. Les chaudières d'établissements de bains ne produisent que 12 kilog. environ de vapeur, c'est-à-dire ne laissent passer que la quantité de chaleur équivalente à cette production, par mètre carré de surface de chauffe et par heure. Les chaudières de bateaux en produisent 15 à 20 kilog. ou 30 à 35 kilog., selon que la combustion est lente ou active; dans ce dernier cas, la dépense relative de combustible est plus grande.

La surface de chauffe se compose de la surface totale des bouilleurs et de la partie de surface de chaudière comprise au-dessous du niveau supérieur des carneaux, niveau qui se trouve à $0^m,10$ ou $0^m,12$ au-dessus de l'axe de la chaudière; les parties des bouilleurs et de la chaudière en contact avec les murettes qui divisent les carneaux sont considérées comme surface de chauffe.

Certaines chaudières portent un cylindre vertical de $0^m,60$ à $0^m,80$ de diamètre et de $0^m,80$ à $0^m,90$ de hauteur, saillant sur le corps de la chaudière et faisant office de réservoir de vapeur. Le niveau de l'eau se trouve aux 2/3 du diamètre de la chaudière; les carneaux s'élèvent à $0^m,10$ en contre-bas de ce niveau, et les praticiens, en prenant pour surface de chauffe la surface totale des bouilleurs, plus la moitié de celle de la chaudière, comptent ordinairement sur $1^{mq},25$ à $1^{mq},30$ de surface de chauffe par force de cheval pour les machines à détente sans condensation de la force de 10 à 20 chevaux.

Le *volume d'eau contenu dans la chaudière* doit être de 6 à 7 fois celui de l'eau à vaporiser en une heure, soit même 10 fois plus si l'on a besoin que la pression varie peu malgré une certaine variation du feu ou de la dépense de vapeur.

Quant à la *chambre de vapeur*, l'expérience lui assigne un volume égal à 2 ou 2,5 fois celui de l'eau à vaporiser par heure.

Dans les locomotives, à cause du fort tirage, on admet que chaque mètre carré de la surface de chauffe qui voit le foyer produit trois fois plus de vapeur qu'un mètre carré de surface de tuyau, et que, en considérant comme surface de chauffe (*dite surface de chauffe réduite*) la surface qui voit le foyer, augmentée du 1/3 de la surface des tubes,

chaque mètre carré produit de de 120 à 160 kilog. de vapeur par heure. (Voir la 4e partie.)

Connaissant la quantité de vapeur à produire, on détermine facilement, d'après ce qui précède, la surface de chauffe nécessaire, et par suite les dimensions de la chaudière.

Lorsque l'effet à produire exige deux chaudières, il convient d'en établir trois, afin que, si l'une d'elles est en réparation, les deux autres fonctionnent; par là, on évite les interruptions de travail.

Nous donnons (p. 954) des résultats d'expériences faites anciennement par Cavé sur un grand nombre de chaudières sans bouilleur ou avec bouilleurs. Ces expériences ont conservé toute leur importance pratique.

D'après ce tableau, la quantité moyenne de vapeur produite par mètre carré de surface de chauffe totale et par heure a été de $22^{kg},25$.

Ce tableau fait voir aussi que les chaudières à bouilleurs ne sont pas les plus avantageuses; c'est ce qui fait que des constructeurs suppriment les bouilleurs, et placent latéralement et parallèlement à la chaudière des tubes chauffés par la fumée, et dans lesquels l'eau circule avant de pénétrer dans la chaudière.

Le faible rendement des chaudières à bouilleurs est dû à ce que la vapeur qui se forme dans les bouilleurs ne trouvant pas un écoulement facile par les cuissards, qui sont parfois trop petits et en nombre insuffisant, ces bouilleurs, qui devaient former la partie la plus active de la surface de chauffe, ne produisent que l'effet de tubes réchauffeurs. De plus, comme il se fait toujours des fissures dans les murettes des carneaux, tous les gaz ne suivent pas le chemin le plus convenable pour l'utilisation de la chaleur.

Enfin, de l'examen de ce même tableau (p. 954), il résulte que la quantité moyenne d'eau vaporisée par kilog. de houille a dépassé 8 kilog. dans les deux circonstances suivantes :

1° Chaudière cylindrique sans bouilleur, à circulation dans deux galeries et un conduit allant à la cheminée (21 mètres de circulation totale et 2 coudes), le rapport de la surface de chauffe à celle de la grille étant 7,6, la surface de chauffe $12^{mq},5$, et la quantité totale de houille brûlée $39^{kg},5$, c'est-à-dire $0^{kg},24$ par décimètre carré de surface de grille.

2° La chaudière précédente avec tube réchauffeur, dans les mêmes circonstances de circulation, le rapport de la surface de chauffe à celle de la grille étant 19, et la quantité totale de houille brûlée étant $37^{kg},15$ en moyenne.

Des expériences de Cavé il résulte que le rapport de la surface de chauffe à celle de la grille étant 17, et la surface de la grille un décimètre carré par $0^{kg},40$ de houille à brûler, on se trouve dans les conditions les plus favorables pour obtenir 8 kilog. de vapeur par 1 kilog. de charbon; mais il convient de considérer $0^{kg},40$ comme étant une limite inférieure. Malgré l'avantage que ces expériences paraissent attribuer aux grandes grilles, la plupart des ingénieurs reviennent aux grilles brûlant 1 à 1 1/2 kilog. de houille par décimètre carré (742).

Anciennes expériences de Cavé sur les chaudières avec ou sans bouilleurs.

SURFACE de grille en décimètres carrés.	SURFACE de chauffe en mètres carrés.	RAPPORT de la surface de chauffe à celle de la grille.	MODE d'alimentation.	HOUILLE brûlée par heure, en kilogrammes		VAPEUR produite en kilogrammes		NATURE DU COMBUSTIBLE.
				par décim. carré de surf. de grille.	par mètre carré de surf. de chauffe.	par heure et par m. q. de surf. de chauffe.	par kil. de houille.	
1° Chaudière de 1 mètre de diamètre et 8 mètres de longueur, sans bouilleurs. La flamme va au fond, en contact avec la moitié du fond et de la partie latérale de la chaudière, et revient au devant en contact avec l'autre moitié, pour s'en retourner à la cheminée par un conduit isolé, au milieu duquel est le tube réchauffeur, de 0m,30 de diamètre, et de 6m,25 de longueur chauffée.								
165	12,50	7,6	eau froide.	0,24	3,16	24,60	7,79	
id.	id.	id.	id.	0,24	id.	27,65	8,72	
id.	id.	id.	id.	0,24	id.	24,50	7,75	
82	id.	15,2	id.	0,48	id.	24,50	7,75	
id.	id.	id.	id.	0,48	id.	23,80	7,55	
id.	id.	id.	id.	0,48	id.	24,40	7,71	
id.	id.	id.	id.	0,39	2,55	16,40	6,45	
id.	id.	id.	id.	0,70	4,60	28,80	6,30	Gaillette de Denain.
id.	id.	id.	tube réch.	0,48	3,16	24,70	7,80	
id.	id.	id.	id.	0,39	2,55	18,90	7,42	
id.	id.	id.	id.	0,48	3,16	24,00	7,60	
id.	id.	id.	id.	0,48	3,15	21,90	6,90	
id.	id.	id.	id.	0,53	3,56	23,30	6,55	
id.	id.	id.	id.	0,47	3,10	21,30	6,90	
id.	id.	id.	id.	0,46	3,06	21,30	6,90	
id.	id.	id.	id.	0,46	3,06	20,30	6,62	
id.	id.	id.	id.	0,46	3,02	20,70	6,85	Tout venant.
id.	id.	id.	id.	0,54	3,56	21,10	5,92	
id.	id.	id.	id.	0,54	3,56	21,00	5,90	
66	id.	19,0	id.	0,60	3,16	22,80	7,20	Grosse gaillette de Denain.
id.	id.	id.	id.	0,56	2,96	24,75	8,35	Gaillette de Denain.
id.	id.	id.	id.	0,60	3,16	21,10	6,62	Fin Denain, pass. à la claie.
id.	id.	id.	id.	0,60	3,16	24,30	7,70	Gaillette impure.
id.	id.	id.	id.	0,60	3,16	20,00	6,32	Gaillette passée à la claie.
id.	id.	id.	id.	0,57	2,98	25,00	8,32	Gaillette de Denain.
2° Même chaudière sans bouilleurs ni retour de fumée. La flamme va directement à la cheminée en léchant toute la surface de chauffe.								
82	12,50	15,2	eau froide.	0,73	4,80	27,20	5,68	
id.	id.	id.	id.	0,73	4,80	27,00	5,60	
id.	id.	id.	id.	0,81	5,30	27,50	5,20	
id.	id.	id.	id.	0,81	5,30	30,00	5,70	
id.	id.	id.	id.	0,81	5,30	31,00	5,86	
165	id.	7,6	id.	0,44	5,80	34,80	6,00	Presque pur St-Étienne.
id.	id.	id.	id.	0,44	5,80	35,60	6,17	
id.	id.	id.	id.	0,44	5.80	37,00	6,41	
id.	id.	id.	id.	0,44	5,80	37,00	6,41	
id.	id.	id.	id.	0,44	5,80	36,90	6,40	
3° Chaudière de 1m,00 de diamètre et de 8m,30 de longueur, à bouilleurs de 0m,40 de diamètre. La flamme va au fond, en contact avec le fond de la chaudière et les 2/3 du contour des bouilleurs, revient au devant en contact à la fois avec le reste de la surface de chauffe, et s'en retourne par le canal du tube réchauffeur.								
165	32,18	19,5	eau froide.	0,24	1,20	8,60	7,12	
id.	id.	id.	id.	0,24	1,20	9,10	7,59	
id.	id.	id.	id.	0,24	1,20	9,12	7,60	Gaillette de Denain.
id.	id	id.	tube réch.	0,24	1,20	8,30	6,90	
id.	id.	id.	id.	0,35	1,75	11,95	6,82	

SURFACE de grille en décimètres carrés.	SURFACE de chauffe en mètres carrés.	RAPPORT de la surface de chauffe à celle de la grille	MODE d'alimentation.	HOUILLE brûlée par heure, en kilogrammes — par décim. carré de surf. de grille.	HOUILLE brûlée par heure, en kilogrammes — par mètre carré de surf. de chauffe.	VAPEUR produite en kilogrammes — par heure et par m. q. de surf. de chauffe	VAPEUR produite en kilogrammes — par kil. de houille.	NATURE DU COMBUSTIBLE.
4° Chaudière de 0m,80 de diamètre et de 5m,88 de longueur, à deux bouilleurs de 0m,40 de diamètre, sans retour de fumée. La flamme va directement à la cheminée en léchant à la fois tout le contour des bouilleurs et la moitié de celui de la chaudière.								
165	21,36	13,0	eau froide.	0,39	3,00	21,07	6,90	Mélange de Tout venant, Saint-Étienne et Denain.
id.	id.	id.	id.	0,39	3,00	21,07	6,90	
id.	id.	id.	id.	0,35	2,74	19,90	7,30	
82	id.	26,0	id.	0,78	3,00	17,50	5,82	
id.	id.	id.	id.	0,75	2,90	17,50	6,02	
id.	id.	id.	id.	0,57	2,18	13,85	6,35	
id.	id.	id.	id.	0,57	2,18	13,40	6,18	
id.	id.	id.	id.	0,52	2,01	11,42	5,70	
165	id.	13,0	id.	0,44	3,40	20,50	6,02	
id.	id.	id.	id.	0,44	3,40	20,40	6,00	
id.	id.	id.	id.	0,44	3,40	22,10	6,50	
id.	id.	id.	id.	0,44	3,40	21,80	6,40	
5° Même chaudière à deux bouilleurs, avec retour simultané de flamme de chaque côté, et fuite à la cheminée par le canal du tube réchauffeur.								
165	21,36	13,0	tube réch.	0,44	3,40	20,90	6,15	Tout venant et Denain.
id.	id.	id.	id.	id.	id.	21,40	6,30	
id.	id.	id.	id.	id.	id.	22,80	6,72	Gaill. de Denain.
id.	id.	id.	id.	id.	id.	23,00	6,78	
id.	id.	id.	id.	id.	id.	20,50	6,02	Gaill. de Commentry.
id.	id.	id.	id.	id.	id.	20,70	6,10	
id.	id.	id.	id.	id.	id.	21,25	6,27	
id.	id.	id.	id.	id.	id.	21,40	6,30	
id.	id.	id.	id.	id.	id.	22,30	6,59	

750. En 1874, des expériences comparatives eurent lieu à Mulhouse, sous les auspices de la Société alsacienne, avec les chaudières suivantes :

Chaudière Lancashire. Elle se compose d'un corps cylindrique de 2m,00 de diamètre et de 7m,85 de longueur, traversé par deux tubes de 0m,70 de diamètre intérieur et de 7m,85 de long, dans lesquels se trouvent les foyers.

Les tôles du corps cylindrique ont 0m,016 d'épaisseur, celle des tubes 0m,013, et celle des fonds 0m,019.

Les grilles ont 1m,550 de long et 1m,383 de large. Déduisant de la longueur 0m,170 pour la partie pleine servant d'appui aux barreaux, la longueur réelle de grille est réduite à 1m,380 et sa surface à 1mq,908.

L'épaisseur des barreaux est de 0m,015, avec 0m,006 d'intervalle.

La surface de chauffe, mesurée sur place, est de 56mq,901.

Chaudière Fairbairn. Elle se compose de deux corps cylindriques de 1m,25 de diamètre et de 7m,85 de long, dans chacun desquels est fixé un tube de même longueur et de 0m,70 de diamètre intérieur; dans ces tubes sont logés les foyers. Ces deux capacités annulaires sont reliées par trois tubulures à un cylindre supérieur de 1m,14 de diamètre et 7m,00 de longueur.

L'épaisseur de la tôle est de 0m,0125 pour le corps cylindrique supérieur, 0m,0135 pour les deux corps cylindriques inférieurs, 0m,013 pour les deux tubes intérieurs, et 0m,018 pour les fonds.

Les grilles sont exactement les mêmes que celles de la chaudière Lancashire.

La surface de chauffe, mesurée sur place, a été trouvée de 94mq,523.

Chaudières à bouilleurs. La chaudière a 9 mètres de long et 1m,14 de diamètre. Les trois bouilleurs ont chacun 10 mètres de long et 0m,50 de diamètre, et sont réunis à la chaudière chacun par trois tubulures.

L'épaisseur de la tôle est de 0m,0125 pour le corps de la chaudière, 0m,014 pour les calottes, et 0m,010 pour les bouilleurs.

La grille a 1m,455 de longueur sur 1m,450 de largeur. En retranchant de la longueur les 0m,170 qui servent d'appui aux barreaux, on a pour la surface de la grille $1,285 \times 1,450 = 1^{mq},863$.

La surface de chauffe totale est de 56mq,446.

Circulation des gaz. Dans la chaudière Lancashire, les gaz, une fois arrivés à l'extrémité des tubes intérieurs, reviennent séparément à l'avant, en circulant de part et d'autre du corps cylindrique à l'extérieur; sous le foyer, ils se réunissent et retournent à la cheminée en chauffant toute la partie inférieure du corps de chaudière.

Dans la chaudière Fairbairn, les deux premières circulations sont les mêmes que dans l'appareil précédent; mais arrivés à l'avant, au lieu de se réunir, les gaz s'en retournent séparément de chaque côté du corps cylindrique, vers la cheminée, et ne se réunissent qu'en quittant la chaudière peu avant le registre.

Dans la chaudière à bouilleurs, le courant gazeux est unique; après avoir chauffé les trois bouilleurs, il revient à l'avant d'un côté du corps supérieur, puis retourne à la cheminée de l'autre côté.

Ces trois chaudières ont donné les résultats consignés dans le tableau p. 957.

Note sur les chaudières en acier (747). — D'après un Congrès tenu à Lyon, il y a quelques années, il y aurait eu de nombreux mécomptes sur l'emploi des tôles d'acier pour chaudière. Deux chaudières d'acier commandées aux usines de Fives-Lille par la Compagnie du chemin de fer du Midi se sont brisées à l'essai à la presse. Aussi cette Compagnie a-t-elle renoncé à l'usage de l'acier pour chaudières. Les Forges et Chantiers de la Méditerranée l'ont également exclu. L'usine Krupp a renoncé aux chaudières en acier. D'après des expériences, l'Amirauté anglaise a émis l'opinion que la tôle d'acier à cause de sa faible épaisseur se corrode plus rapidement que la tôle de fer à résistance égale. La tôle d'acier, suivant M. Roland, présente la propriété de se fendre et de se criquer au bord des rivures et tout autour des trous de rivets. D'après toutes ces raisons, la tôle d'acier est délaissée par certains constructeurs.

Expériences entreprises à Mulhouse en 1874 (750). Tableau des moyennes obtenues avec des houilles de Ronchamp et de Saarbruck.

	RONCHAMP (forte charge).			RONCHAMP (faible charge).			SAARBRUCK.			MOYENNES GÉNÉRALES.		
Chaudière : Moyenne de :	Lancash. 9 jours.	Bouilleurs 6 jours.	Fairbairn 5 jours.	Lancash. 3 jours.	Bouilleurs 3 jours.	Fairbairn 3 jours.	Lancash. 3 jours.	Bouilleurs 3 jours.	Fairbairn 3 jours.	Lancashire.	Bouilleurs.	Fairbairn.
Pression moyenne. . . . . . atm.	4,614	4,645	4,668	4,661	4,639	4,631	5,129	5,098	5,101	»	»	»
Houille brute. . . . . kil.	1914,3	2015,92	1850,94	1041	1113,25	1070,3	1649	1697	1658,1	1534,8	1608,72	1526,44
Scories. . . . . kil.	272,7	283,5	255,5	152,8	151	143	162	155	175	»	»	»
Houille pure. . . . . kil.	1657,6	1732,42	1595,44	888,2	962,25	937,3	1487	1542	1483,1	»	»	»
Scories p. 100. . . . . kil.	14,12	14,05	13,80	14,61	13,58	13,45	9,72	9,4	10,55	»	»	»
Eau évaporée à 0°. . . . . . kil.	13979,4	14220	14671,7	7986,5	8209,6	8150,3	10581,51	10942,8	11285,1	10849,1	11124,1	11369
Rendement brut. . . . . . . kil.	7,306	7,061	7,926	7,669	7,376	7,636	6,412	6,445	6,805	7,129	6,961	7,458
Rendement houille pure. . . kil.	8,509	8,216	9,194	8,986	8,535	8,822	7,108	7,091	7,609	8,201	7,947	8,542
Gaz, températ. moyenne en degrés	300,3	294,7	216,2	207,8	218,4	169,7	290,8	284,5	205,49	266,3	265,8	197,1
Analyse des gaz à l'appareil Orsat. p. 100 CO^2.	11,57	10,82	9,95	11,27	11,91	8,73	11,71	11,71	10,89	»	»	»
— O.	5,98	6,41	8,96	7,32	6,64	10,62	7,04	7,079	8,45	»	»	»
— CO.	0,26	0,74	. . . .	0,33	0,22	0,14	1,01	0,45	0,23	»	»	»
Air à 0° et 0^m,76 (vol. en mèt. cub. par kilog. de houille).	11,439	12,138	14,139	12,128	12,06	16,288	11,259	11,176	12,183	11,609	11,791	14,203
Rendement, celui de la chaudière Fairbairn étant représ. par 100.	92,5	89,3	100	96,97	92,11	100	93,4	93,2	100	96	93	100

751. Principaux types de générateurs à vapeur. Indépendamment de la chaudière horizontale sans bouilleur (744) et de la chaudière à deux bouilleurs (745), qui sont les types les plus anciens à foyer extérieur, on peut distinguer, parmi les chaudières à foyer intérieur, les chaudières tubulaires horizontales (type locomotive), puis les chaudières verticales tubulaires, les chaudières tubulaires obliques, en outre les chaudières multitubulaires, qui ont pris un grand développement et ont pour objet de répartir la surface de chauffe sur un grand nombre de petits éléments. Elles sont caractérisées par une grande surface de chauffe, et par l'emploi d'une très petite quantité d'eau, circonstances qui atténuent la gravité des accidents, si redoutables avec de grandes masses d'eau. Nous allons passer en revue différents générateurs les uns anciens, les autres nouveaux, en insistant sur la caractéristique de chacun.

752. Chaudière Farcot. Cette ancienne chaudière se compose de deux corps cylindriques superposés; le cylindre supérieur sert de réserve d'eau et de vapeur, et l'autre, inférieur, contient un faisceau tubulaire amovible. Ces deux corps sont enfermés dans une chambre divisée en deux capacités par des cloisons. Une autre disposition consiste à adopter deux bouilleurs réchauffeurs placés un peu en pente dans le sens longitudinal. Les courants d'eau et de flamme sont inverses l'un de l'autre. Cette disposition produit un chauffage méthodique (716), par la raison que le courant de la flamme est inverse de celui de l'alimentation de l'eau. L'alimentation se fait par la partie la plus basse des bouilleurs.

Ce générateur a servi de type à un grand nombre de chaudières.

Nous devons signaler aussi un type de générateur semi-tubulaire qui a reçu un grand nombre d'applications dans le Nord, et qui comprend deux gros bouilleurs horizontaux et, au-dessus, un corps cylindrique tubulaire à fond plat réuni par des cuissards aux deux bouilleurs inférieurs.

753. Réchauffeur. La plupart des chaudières de n'importe quel système sont munies d'un réchauffeur. Cet appareil se compose d'une série de tubes, dans lesquels l'eau, refoulée par une pompe, circule avant de se rendre dans la chaudière. La vapeur d'échappement, arrivant du cylindre de la machine à vapeur, enveloppe ces tubes avant de se rendre à la cheminée. Cette vapeur réchauffe donc l'eau d'alimentation en lui cédant une partie de la chaleur qu'elle possède encore; on réalise ainsi une grande économie de combustible, en même temps qu'une grande régularité dans la pression.

On donne aux réchauffeurs une surface qui varie du 1/10 au 1/5 de celle de la chaudière. Leurs tôles doivent être renforcées, à cause des corrosions intérieures produites par le dégagement de l'oxygène dissous dans l'eau.

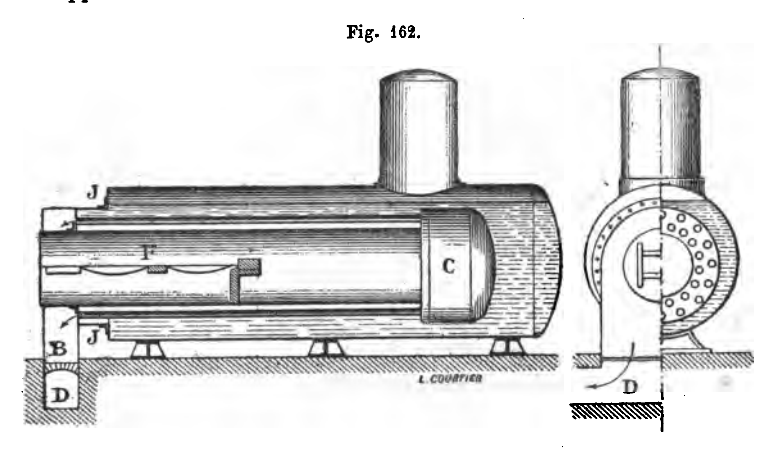
754. Chaudière dite de Cornouailles. En Angleterre, on fait un grand usage du type ancien de chaudière dit de *Cornouailles*, qui comprend un gros corps cylindrique de $1^m,30$ à $1^m,60$ de diamètre renfermant de l'eau et contenant un tube intérieur non concentrique (laissant passer

les produits de la combustion) en tête duquel est placé le foyer. Ce tube-foyer en contient un autre plus petit servant de bouilleur, s'appuyant sur l'autel en maçonnerie. Ce bouilleur, rempli d'eau, est mis en communication avec le grand corps cylindrique au moyen d'une tubulure. L'eau de ce dernier corps cylindrique s'élève plus haut que le bouilleur-foyer.

Ce générateur de Cornouailles peut fournir 8 kilog. de vapeur par kilogramme de houille consommée, tandis qu'un générateur ordinaire à bouilleurs n'en donnera que 7 kilog. au maximum. Il est fréquemment employé dans le sud-est de la France.

755. Chaudière de Thomas et Laurens, à foyer amovible (*fig.* 162). Cet ancien générateur se compose d'un foyer intérieur cylindrique et d'une chambre de combustion C, placée à la suite du tube-foyer. Autour de ce foyer sont disposés des tubes horizontaux ramenant les flammes dans la boîte B en avant de la chaudière, d'où les gaz circulant tout autour de l'enveloppe déterminent une troisième circulation, ou bien s'échappent dans la cheminée D.

Fig. 162.



Le foyer est amovible et se démonte facilement au moyen du joint JJ. Deux rails servent à faire glisser le foyer-tube lors de son démontage. Cette chaudière ancienne a été quelque peu modifiée par un grand nombre de constructeurs; elle est considérée comme un type très bien agencé.

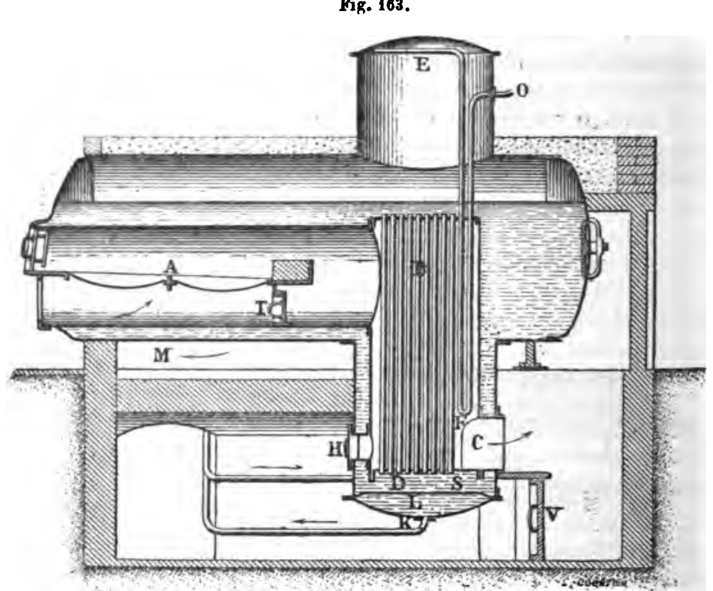
756. Chaudière Galloway. Cette chaudière est très employée en Angleterre, et elle est aussi très appréciée en France. Chaque corps cylindrique est surmonté d'un dôme de prise de vapeur. Le foyer est intérieur et de section ovale. Il est traversé dans sa hauteur par une série de tubes coniques dont la partie évasée est en haut. Suivant les dispositions, il y a un ou deux réchauffeurs d'eau (753) ayant pour objet d'absorber le calorique que possèdent encore les gaz de la combustion après leur marche dans la traversée du faisceau tubulaire. Ce générateur figurait déjà à l'Exposition de 1878 et aussi en 1889.

Cette chaudière est facile à nettoyer et possède une grande puissance de vaporisation. L'eau renfermée dans la chaudière subit une circulation active, due à la présence des tubes, qui s'oppose aux dépôts. L'eau en sortant des tubes coniques fait retour sur les côtés de la chaudière, où elle est chauffée par les gaz des carneaux. Le chauffage y est méthodique, la marche des flammes est inverse de celle de l'alimentation.

La maison Archambault et C[e] qui construit ces sortes de chaudières en fait seize grandeurs différentes.

757. Chaudière de Laharpe et Fouché (*fig.* 163). Ce générateur est à

Fig. 163.



tubes bouilleurs verticaux, placés dans un corps cylindrique servant d'enveloppe générale. Les extrémités de ces tubes B, en haut et en bas, sont en communication avec l'eau de la chaudière. Le foyer A intérieur est placé en avant du système de tubes verticaux. La cheminée C est à l'arrière et à la partie inférieure de la chaudière. Les flammes sont renversées. Ce générateur donne 8 kilog. de vapeur par kilog. de houille et occupe peu d'espace. Voir dans la figure les dispositions principales:

EFO est la prise de vapeur;
H tampon de nettoyage;
T tampon servant à l'enlèvement des cendres;
S arrivée de l'eau d'alimentation;
M carneau conduisant les gaz à la cheminée.

On ajoute souvent à cette chaudière un réchauffeur placé à la sortie des gaz, lequel est formé d'un faisceau tubulaire disposé comme celui de

la chaudière proprement dite. L'alimentation de la chaudière est faite au moyen de l'eau de ce réchauffeur.

Le ramonage des tubes se fait au moyen d'un jet de vapeur qu'on envoie à leur partie inférieure.

758. Générateurs de vapeur à petits éléments. Dans ces dernières années, l'emploi de la vapeur à haute pression s'est imposé et a permis de réaliser une grande économie pécuniaire pour l'emploi des pressions de 10 et 12 atmosphères. Les anciens types de chaudières sont devenus pour ces pressions tout à fait inapplicables par suite des grands espaces qu'ils auraient occupés. On a été ainsi conduit à créer de nouveaux types de chaudières présentant de très grandes surfaces de chauffe sous un faible volume. Le problème a été résolu par l'emploi de tubes employés en grand nombre, et d'une manière générale au moyen de petits éléments. La sécurité qui résulte de l'emploi des générateurs à petites dimensions est due non seulement à la petite capacité réservée à l'eau, mais surtout à la répartition de cette eau et de la vapeur dans un grand nombre d'éléments qui ne communiquent entre eux que par des raccords à section étroite. Dans ces conditions, si une rupture vient à se produire, il en résulte un écoulement d'eau et de vapeur sous forme de fuite; mais il n'y a plus d'effet instantané et l'explosion générale est évitée.

Les générateurs à petits éléments sont pour la plupart formés d'un faisceau de tubes plus ou moins inclinés parcourus par l'eau à vaporiser soumis directement à l'action du foyer.

Ces tubes sont réunis à leurs extrémités par des communications ou collecteurs, sortes de caisses. Le faisceau tubulaire est surmonté en général d'un ou de plusieurs réservoirs où affleure le niveau de l'eau des tubes. C'est là une disposition générale représentée par la figure 164, qui se rapporte à la chaudière de Naeyer (760).

759. Chaudière Belleville. On peut distinguer une autre disposition se rapportant à la chaudière Belleville et qui est caractérisée par des éléments disposés en serpentin, parcourus par l'eau. Les diamètres de ces serpentins sont de 70, 80 et 100 millimètres. Cette chaudière tient peu de place et permet d'atteindre des pressions élevées de 10, 12 et 15 atmosphères.

Les générateurs multitubulaires présentent donc des caractères distinctifs : tels que la sécurité, l'économie de combustible, un faible poids, un emplacement restreint, une grande facilité de montage et une mise rapide en pression. Ils permettent d'obtenir de grandes puissances. Mais ils exigent une bonne confection et des soins particuliers, en ce qui concerne la conduite du feu et leur alimentation.

Dans la marine, leurs qualités caractéristiques de faible poids et de grande puissance sont mises à profit. Les générateurs à petits éléments de Belleville ont reçu des applications nombreuses dans les manufactures de l'État et dans les services nationaux. Les théâtres du Grand Opéra, de la Comédie française, de l'Odéon, de la Gaîté, du Châtelet, etc., font

usage des générateurs Belleville pour la production de la lumière électrique.

760. Chaudière de Naeyer. Ce générateur multitubulaire est caractérisé par un faisceau de tubes en fer laminé T inclinés remplis d'eau. Le diamètre maximum de ces tubes est de $0^m,120$; leur épaisseur est de $0^m,005$ et leur longueur varie de 3 à 5 mètres.

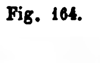
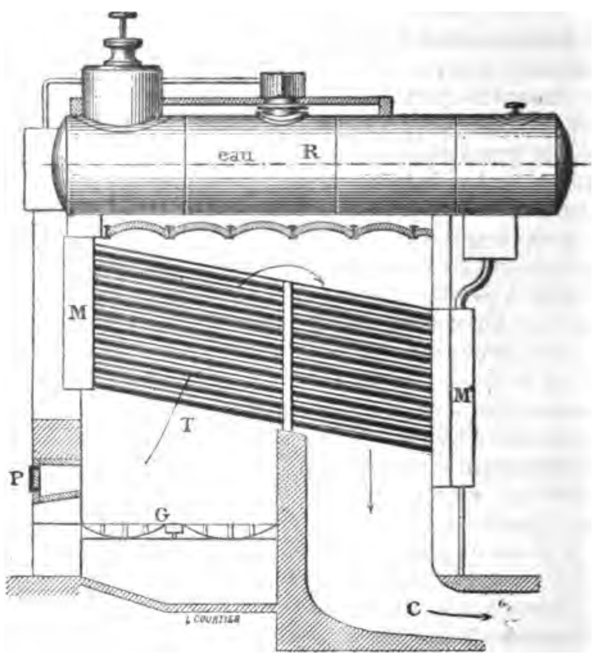


Fig. 164.



L'assemblage de deux tubes forme un élément, et la réunion de plusieurs éléments forme une série placée dans des plans verticaux parallèles à l'axe de la chaudière. Le générateur de vapeur est ainsi constitué par des séries verticales de tubes inclinés de l'avant à l'arrière de la chaudière. La vapeur produite par l'échauffement de l'eau dans les tubes se dégage au moyen des communications de l'avant de la chaudière et se rend dans un collecteur horizontal placé à proximité, puis dans un grand réservoir en tôle R non chauffé et placé à la partie supérieure. Deux tubes quadrangulaires en fer M et M' sont disposés en haut et en bas du faisceau des tubes inclinés. Le tube quadrangulaire inférieur M' fournit l'eau à chacune des séries; le tube quadrangulaire supérieur M reçoit la vapeur formée. Les flammes traversent deux fois le faisceau des tubes inclinés, au moyen de chicanes en fontes disposées à cet effet.

Des deux côtés du fourneau sont installées des portes P servant au nettoyage.

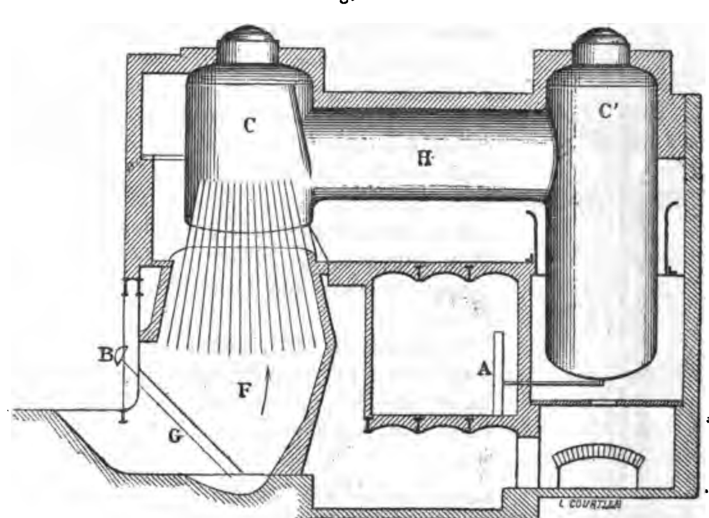
Ce générateur est considéré comme donnant des résultats satisfaisants

et un rendement aussi élevé que possible, et produisant la vapeur dans de bonnes conditions. La rapide circulation de l'eau dans les tubes assure une température uniforme dans la masse du liquide.

Les tubes vaporisateurs sont disposés en quinconce. Leur longueur est sectionnée en plusieurs parties au moyen de cloisons ou chicanes forçant les gaz à se diviser en couches minces : ce qui permet une bonne utilisation du calorique.

761. Chaudière Dulac (*fig.* 165). Ce générateur de vapeur, enfermé dans

Fig. 165.



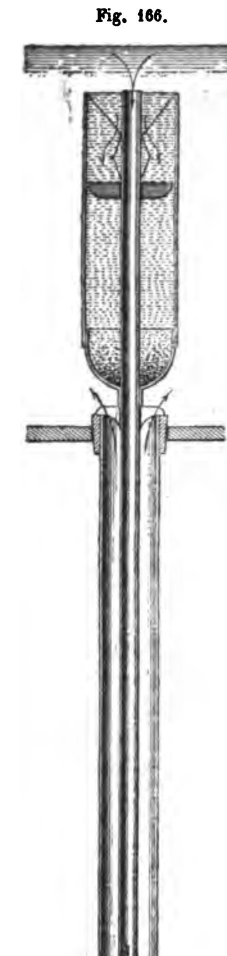
un massif de briques, se compose des deux cylindres verticaux C, C remplis d'eau et réunis par un cylindre horizontal H dans lequel le niveau de l'eau est situé à la hauteur de l'axe. Le fond inférieur du cylindre vertical C est placé au-dessus du foyer F. De ce fond partent des tubes en fer fermés à leurs extrémités inférieures, pénétrant dans le foyer F. Ces tubes pendentifs contiennent chacun un tube en fer de circulation qui se termine à sa partie supérieure par un collecteur de dépôts des eaux d'alimentation (*fig.* 166). Cette figure donne la disposition d'un des éléments du faisceau tubulaire [vertical en éventail. Cet élément contient un tube central venant s'arrêter à une petite distance du tube pendentif et portant à sa partie supérieure un tube plus large dans lequel viennent se déposer les boues qui n'ont pas été entraînées par le courant.

Les gaz, après avoir suivi ces tubes, contournent le cylindre horizontal supérieur H, d'où ils redescendent en tournant autour du second cylindre vertical C'; puis s'échappent dans un carneau inférieur qui les conduit à la cheminée.

L'alimentation se fait en A vers la sortie des gaz, c'est-à-dire au bas

du second cylindre vertical. La chaudière Dulac est munie d'une grille en fonte G, inclinée à 45°; ce qui facilite la descente graduelle de la houille. Un chargeur basculant B empêche les rentrées d'air pendant le chargement du combustible. Les barreaux de cette grille sont rafraîchis au moyen d'un courant d'eau pratiqué dans les longerons qui portent cette grille. L'eau qui s'échappe ainsi est utilisée pour l'alimentation de la chaudière. Le chauffage est absolument méthodique. Ce générateur présente une très grande sécurité.

Fig. 166.



L'appareil Dulac peut être considéré comme formé de trois parties : 1° le *vaporisateur* C comprenant un système de tubes pendentifs; 2° le cylindre horizontal supérieur H servant d'*accumulateur* de chaleur et le second cylindre vertical C′ servant de *réchauffeur*.

Une chaudière du système Dulac était en fonctionnement à l'Exposition de 1889; elle fournissait en moyenne 1000 kilog. de vapeur à l'heure.

Des essais de vaporisation ont permis de constater que cette chaudière pouvait produire, avec un feu modéré, 2000 kilog. de vapeur à l'heure. La surface de chauffe se décompose comme il suit :

Surface du corps de la chaudière H	11^{m2},50
Surface tubulaire C.	61 ,39
Surface du réchauffeur vertical C′.	13 ,50
Surface totale.	86^{m2},39

Les températures des gaz relevées chaque jour ont donné les moyennes:

Température de l'air dans le cendrier	90°
— des gaz dans le foyer.	1400°
— des gaz au delà des tubes F.	580°
— des gaz sous le réchauffeur.	190°

762. Il y a un grand nombre de chaudières du système multitubulaire. Nous citerons la chaudière de M. Roser, qui comprend un faisceau tubulaire formé de tubes inclinés reliés par des collecteurs verticaux à secteur rectangulaire. Ces tubes sont traversés par d'autres tubes donnant passage à la fumée. Les collecteurs d'avant sont réunis à leur partie supérieure par un bouilleur horizontal relié au moyen d'une tubulure au corps principal de la chaudière. Les collecteurs d'arrière sont mis en communication à leur partie inférieure avec un bouilleur relié au corps principal de la chaudière par deux tubulures verticales. La vapeur, à la sortie du réservoir, passe dans des sécheurs horizontaux, placés

au-dessus du faisceau tubulaire dans le courant des gaz chauds.

L'alimentation se fait par la partie supérieure; l'eau entraîne tous les dépôts dans l'hydro-déjecteur, où l'on peut les recueillir.

L'eau du bouilleur, des collecteurs et celle de la partie annulaire des tubes tendent à déplacer l'eau du corps supérieur dont la température est moins élevée, et il s'établit une circulation rapide.

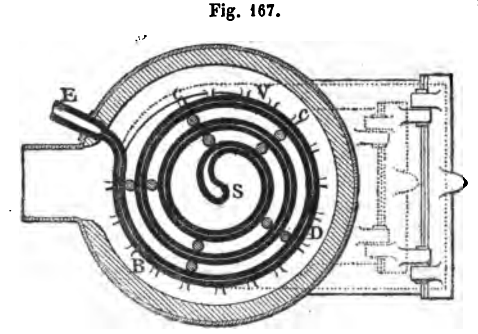
M. Roser construit aussi un autre type de chaudière à doubles tubes avec retour de flammes dans les tubes intérieurs.

Cette disposition à retour de flammes répond à la nécessité d'installer un générateur d'une grande puissance dans un emplacement restreint. La surface de chauffe et la puissance de la chaudière sont ainsi considérablement augmentées.

Parmi les nombreux générateurs de vapeur du système multitubulaire que l'on voyait à l'Exposition universelle de 1889, on peut citer ceux de Lencauchez et Bourgeois, ceux de Lagosse et Bouché, le système de Babcock et Wilcox, ce dernier présentant un grand nombre de variantes; le système Conrad Knap et Cᵉ, de Londres; le système Davey-Paxman et Cᵉ, de Colchester, etc.

763. Générateur Serpollet. Le principe de ce générateur repose exclusivement sur la vaporisation instantanée qui se produit dans le phénomène de la caléfaction. L'inventeur s'est proposé d'écraser les gouttelettes globulaires au fur et à mesure de leur formation, de manière à produire la vaporisation immédiate. A cet effet, il prend un tube en fer, cylindrique, de forte épaisseur, qu'il aplatit et lamine à chaud à une température inférieure à celle de la soudure du métal. L'espace libre à l'intérieur du tube apparaît alors comme une ligne noire très fine. Ensuite, il donne au tube certains contours (en serpentin, par exemple), suivant l'emplacement qu'on veut lui faire occuper. On adapte à chacune de ses extrémités un raccord.

Fig. 167.



Le tube ainsi préparé peut servir de générateur de vapeur. En effet, si on le chauffe à 250°, et si on injecte de l'eau à l'une de ses extrémités, on recueille à l'autre de la vapeur à une forte pression.

Ce générateur peut être appliqué aux moteurs de faibles dimensions. L'alimentation se fait au moyen d'une petite pompe de compression. Un générateur de 1 cheval construit dans ce système pèse 33 à 34 kilog. avec son foyer; le moteur pèse 70 kilog. et marche à 350 tours par minute. Le tube a 2 mètres de développement et une hauteur de 105 millimètres avec une épaisseur de 21 millimètres.

On a fait des applications de ce système à un tricycle et à un canot à

hélice. C'est une invention très intéressante à signaler et qui peut rendre des services pour les petites forces et aussi lorsqu'on est limité par l'emplacement.

Ce générateur présente une grande sécurité. Dans une expérience faite devant les ingénieurs des mines, la pression intérieure du tube a atteint 800 atmosphères sans occasionner aucune rupture.

Dans ces derniers temps, on a fait l'application de ce générateur à la traction des voitures. On est ainsi arrivé à produire une puissance de plusieurs chevaux.

763 *bis*. Résumé d'une étude sur le rendement des chaudières à vapeur, faite par *M. A. Huet*. Cette étude a été présentée au Congrès de mécanique tenu à l'Exposition universelle de 1889. D'après un grand nombre de données expérimentales, l'auteur établit qu'il est possible d'exprimer le rendement du combustible pour une chaudière en fonction des éléments principaux : poids de combustible brûlé, surface de chauffe et surface de grille. La formule est la suivante :

$$d = \frac{b.c}{a}$$

d kilog. de vapeur produite par kilog. de combustible;
a kilog. de combustible brûlé par heure et par mètre carré de grille;
b rapport de la surface de chauffe à la surface de grille;
c kilog. de vapeur produite par heure et par mètre carré de surface de chauffe.
a, b, c, d sont des valeurs moyennes.

764. *Tableau des éléments de diverses chaudières, rapportés au mètre carré de surface de grille.*

SYSTÈMES DE CHAUDIÈRES.	SURFACE de chauffe.	CONTENANCE en eau sous vapeur.	CONTENANCE en vapeur.	QUANTITÉ de vapeur par heure.	POIDS DE VAPEUR par kilog. de houille sans réchauffeur.	POIDS DE VAPEUR par kilog. de houille avec réchauffeur.
	m. carr.	m. cub.	m. cub.	kilog.	kilog.	kilog.
Chaudière sans bouilleur.	16	4	3,800	400	6,500	8,500
Chaudière avec bouilleurs	30	5,700	2,000	500	7,000	8,700
Chaudière Cornouailles.	29	4,500	3,000	500	7,000	8,000
Chaudière Galloway	33	3,800	2,030	500	8,500	9,500
Chaudière semi-tubulaire Farcot. . .	50	4,900	2,300	500	8,800	9,500
Ch. semi-tubul. Thomas et Laurens. .	51,60	4,850	1,685	620	8,500	»
Ch. semi-tubulaire L. Dulac.	25,00	2,000	1,000	500	8,800	9,500
Ch. multitubulaire Belleville et Cᵉ. .	26,25	0,375	0,780	400	8,000	»
Ch. multitubulaire de Naeyer et Cᵉ.	42,00	1,000	0,860	420	8,800	»
Ch. verticale à tubes pendentifs. . .	25,00	0,900	1,250	500	7,000	»
Ch. Roser	9,15	1,400	0,530	400	5,500	6,500
Ch. Fouché et de Laharpe.	34,60	2,360	0,500	415	8,500	»
Ch. amovible Thomas et Laurens. . .	40,00	2,600	1,300	600	8,000	»

Dimensions des chaudières horizontales tubulaires et à foyer intérieur des machines à vapeur locomobiles et fixes, depuis la force de 2 jusqu'à 40 chevaux-vapeur timbrées à une pression de 7 kilog. par centimètre carré.

Force des chaudières en chevaux-vapeur.		2-3	3-4	4-6	5-7	7-10	10-14	12-16	15-21	20-26	25-33	32-42	40-55
Catégories dans lesquelles se trouvent les chaudières		3e	3e	3e	2e	2e	2e	2e	2e	2e	2e	2e	1re
		mèt.	mèt.	mèt.	mèt.	mèt.	mèt.	mèt.	mèt.	mèt.	mèt.	mèt.	mèt.
Corps de la chaudière	Longueur	2,080	2,150	2,465	2,705	2,815	3,040	3,240	3,380	3,605	3,945	4,350	4,760
	Diamètre	0,500	0,580	0,640	0,710	0,740	0,800	0,860	0,910	0,980	1,060	1,120	1,200
Enveloppe du foyer	Hauteur	0,800	0,880	0,960	1,030	1,100	1,200	1,320	1,370	1,480	1,590	1,670	1,760
	Longueur	0,500	0,580	0,640	0,710	0,740	0,800	0,860	0,910	0,980	1,060	1,120	1,200
	Largeur	0,500	0,580	0,640	0,710	0,740	0,800	0,860	0,910	1,980	1,060	1,120	1,200
Foyer	Hauteur	0,630	0,700	0,760	0,760	0,870	0,950	1,020	1,100	1,120	1,180	1,200	1,300
	Diamètre	0,390	0,450	0,500	0,560	0,590	0,640	0,690	0,720	0,780	0,860	0,910	0,990
Tubes	Nombre	8	12	14	16	18	22	25	28	32	38	41	42
	Diamètre	0,060	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070
	Longueur	1,470	1,470	1,695	1,875	1,920	2,060	2,170	2,250	2,370	2,630	2,920	3,280
Cheminée	Hauteur	2,250	2,250	2,500	2,750	2,750	3,000	3,250	3,500	3,750	4,000	4,250	4,500
	Diamètre	0,180	0,200	0,210	0,220	0,235	0,270	0,305	0,335	0,370	0,405	0,420	0,430
Surface de chauffe totale		3,30	5,10	6,40	8,00	9,25	12,00	14,25	16,25	19,50	25,25	30,25	35,00
Capacité totale de la chaudière		0,284	0,409	0,543	0,746	0,869	1,087	1,288	1,486	1,870	2,415	2,888	3,900
Grille (surface)		0,110	0,140	0,180	0,220	0,253	0,298	0,346	0,387	0,441	0,541	0,636	0,691
Quantité de vapeur qu'elles peuvent produire.		66	100	130	160	190	270	300	400	500	650	800	1,000

Dimensions des chaudières horizontales à foyer démontable et à retour de flamme, timbrées à 7 kilog. par centimètre carré, depuis 5 jusqu'à 60 chevaux-vapeur.

Puissance des chaudières en chevaux-vapeur		5-7	7-10	10-14	12-16	15-21	20-26	25-33	32-42	40-55	50-65	60-75
Catégories dans lesquelles se trouvent les chaudières		2^{e}	2^{e}	2^{e}	2^{e}	1re	1re	1re	1re	1re	1re	1re
Corps de la chaudière	Longueur	2^{m},400	2^{m},600	2^{m},800	3^{m},000	3^{m},220	3^{m},500	3^{m},900	4^{m},200	4^{m},600	5^{m},000	5^{m},400
	Diamètre	0 ,820	0 ,900	1 ,000	1 ,080	1 ,120	1 ,160	1 ,200	1 ,250	1 ,300	1 ,400	1 ,500
Foyer	Longueur	1 ,900	2 ,000	2 ,150	2 ,250	2 ,350	2 ,500	2 ,800	3 ,050	3 ,350	3 ,700	4 ,000
	Diamètre	0 ,440	0 ,490	0 ,560	0 ,600	0 ,640	0 ,680	0 ,700	0 ,740	0 ,770	0 ,850	0 ,900
Tubes	Nombre	14	18	22	24	28	32	36	40	42	46	50
	Diamètre	0^{m},070	0^{m},070	0^{m},070	0^{m},070	0^{m},070	0^{m},070	0^{m},070	0^{m},070	0^{m},070	0^{m},070	0^{m},070
	Longueur	1 ,900	2 ,000	2 ,150	2 ,250	2 ,350	2 ,500	2 ,800	3 ,050	3 ,350	3 ,700	4 ,000
Cheminée	Diamètre	0 ,235	0 ,270	0 ,305	0 ,335	0 ,370	0 ,400	0 ,420	0 ,440	0 ,450	0 ,480	0 ,500
Surface de chauffe totale		8^{m2},00	10^{m2},50	13^{m2},60	15^{m2},80	18^{m2},20	22^{m2},60	28^{m2},00	33^{m2},50	39^{m2},00	46^{m2},00	55^{m2},00
Capacité totale de la chaudière		0^{m3},950	1^{m3},050	1^{m3},380	1^{m3},723	2^{m2},024	2^{m3},350	2^{m3},700	3^{m3},080	3^{m3},540	4^{m3},350	5^{m3},325
Quantité de vapeur produite		120^{k}	160^{k}	210^{k}	280^{k}	320^{k}	360^{k}	450^{k}	560^{k}	670^{k}	900^{k}	1100^{k}
Surface des grilles		0^{m2},250	0^{m2},300	0^{m2},390	0^{m2},490	0^{m2},560	0^{m2},650	0^{m2},750	0^{m2},820	0^{m2},930	1^{m2},200	1^{m2},400

***Dimensions des chaudières verticales à foyer intérieur et à bouilleurs des machines à vapeur locomobiles et demi-fixes, depuis la force de 1 jusqu'à 20 chevaux-vapeur, timbrées à une pression de 7 kilog. par centimètre carré* (d'Hermann-Lachapelle).**

Force des machines en chevaux-vapeur		1	2	3	4	6	8	10	12	15	20
Catégories dans lesquelles se trouvent les chaudières		3^{e}	3^{e}	3^{e}	3^{e}	2^{e}	2^{e}	2^{e}	2^{e}	1re	1re
Corps de la chaudière	Hauteur	1^{m},030	1^{m},240	1^{m},400	1^{m},540	1^{m},750	1^{m},920	2^{m},100	2^{m},210	2^{m},400	2^{m},580
	Diamètre	0 ,510	0 ,650	0 ,820	0 ,930	1 ,080	1 ,230	1 ,320	1 ,460	1 ,630	1 ,940
Foyer	Hauteur	0 ,680	0 ,880	1 ,000	1 ,110	1 ,250	1 ,305	1 ,500	1 ,565	1 ,680	1 ,800
	Diamètre	0 ,400	0 ,520	0 ,680	0 ,780	0 ,930	1 ,080	1 ,145	1 ,270	1 ,430	1 ,750
Bouilleurs	Nombre	1	2	2	2	6	6	6	6	6	6
	Diamètre	0^{m},200	0^{m},220	0^{m},250	0^{m},290	0^{m},220	0^{m},250	0^{m},290	0^{m},380	0^{m},350	0^{m},380
	Longueur	0 ,400	0 ,520	0 ,680	0 ,780	0 ,930	1 ,080	1 ,145	1 ,270	1 ,430	1 ,750
Cheminée	Hauteur	0 ,300	0 ,300	0 ,330	0 ,360	0 ,430	0 ,480	0 ,500	0 ,530	0 ,580	0 ,650
	Diamètre	0 ,150	0 ,170	0 ,190	0 ,220	0 ,260	0 ,300	0 ,320	0 ,345	0 ,365	0 ,425
Surface totale de chauffe		1^{m2},150	2^{m2},200	3^{m2},400	4^{m2},400	7^{m2},000	9^{m2},000	11^{m2},000	13^{m2},200	16^{m2},000	22^{m2},100
Capacité totale de la chaudière		0^{m3},107	0^{m3},215	0^{m3},315	0^{m3},460	0^{m3},850	1^{m3},150	1^{m3},300	1^{m3},700	2^{m3},300	3^{m3},740
Grille, diamètre		0^{m},300	0^{m},380	0^{m},490	0^{m},585	0^{m},730	0^{m},840	0^{m},920	1^{m},000	1^{m},100	1^{m},270
Quantité de vapeur produite		35^{k}	70^{k}	105^{k}	140^{k}	210^{k}	280^{k}	350^{k}	420^{k}	525^{k}	700^{k}
Poids des chaudières		310^{k}	480^{k}	720^{k}	980^{k}	1560^{k}	2000^{k}	2500^{k}	3100^{k}	3800^{k}	4600^{k}

765. Prix des divers types de chaudières. (Maison J. Boulet, successeur de J. Hermann-Lachapelle) :

1° Chaudières à vapeur verticales à bouilleurs croisés.

PUISSANCE DES CHAUDIÈRES EN CHEVAUX-VAPEUR	1	2	3	4	6	8	10	12	15	20
Prix de la chaudière sans garnitures ni appareils de sûreté.	350^f	590^f	810^f	1080^f	1560^f	2080^f	2900^f	3480^f	4350^f	5800^f
Prix des garnitures et appareils de sûreté	270	320	400	480	650	800	900	1000	1100	1200
Prix de la chaudière avec garnitures et appareils de sûreté.	620	910	1210	1560	2210	2880	3800	4480	5450	7000
Prix de l'injecteur, tout posé	240	260	280	300	350	375	425	450	500	550

2° Chaudières à vapeur horizontales à retour de flamme et à foyer amovible.

PUISSANCE DES CHAUDIÈRES EN CHEV.-VAP.	4-5	6	8	10	12	15	20	25	30-32	40	50	56
Surface de chauffe, en mètres carrés	$5^{m2},75$	$7^{m2},20$	$8^{m2},90$	$10^{m2},70$	$12^{m2},20$	$15^{m2},00$	$19^{m2},00$	$23^{m2},25$	$27^{m2},00$	$33^{m2},50$	$40^{m2},00$	$48^{m2},00$
Prix des chaudières	2500^f	2700^f	3100^f	3400^f	3800^f	4250^f	4850^f	5500^f	6250^f	7000^f	8000^f	9700^f
Poids approximatif	1300^k	1600^k	2260^k	2600^k	2900^k	3500^k	4200^k	4800^k	5400^k	6400^k	7400^k	8500^k

3° Chaudières à vapeur horizontales tubulaires à foyer extérieur.

PUISSANCE EN CHEVAUX-VAPEUR	8	10	12	15	20	25	30	35	40	50
Prix des chaudières	2100^f	2350^f	2650^f	3050^f	3650^f	4300^f	4950^f	5600^f	6100^f	7350^f
Surface de chauffe, en mètres carrés	$12^{m2},00$	$15^{m2},00$	$18^{m2},00$	$22^{m2},50$	$30^{m2},00$	$37^{m3},50$	$45^{m2},00$	$52^{m2},50$	$60^{m2},00$	$75^{m2},00$
Capacité totale, en mètres cubes	$1^{m3},597$	$1^{m3},773$	$2^{m3},009$	$2^{m3},563$	$3^{m3},681$	$4^{m3},430$	$5^{m3},432$	$5^{m3},883$	$6^{m3},592$	$7^{m3},660$
Poids approximatif	2600^k	3000^k	3500^k	4200^k	5200^k	6300^k	7200^k	8600^k	9600^k	11000^k
Prix approximatif de la maçonnerie, sans la cheminée	375^f	450^f	520^f	650^f	900^f	1000^f	1150^f	1350^f	1500^f	1850^f

4° Chaudières à vapeur horizontales tubulaires à flamme directe et à foyer intérieur.

Puissance des chaudières en chevaux-vapeur.	2	3	4-5	6	8	10	12	15	20	25	30-32
Surface de chauffe en mètres.	3m²,30	4m²,60	6m²,40	8m²,00	9m²,25	11m²,00	12m²,70	15m²,00	19m²,00	23m²,00	27m²,00
Prix des chaudières.	1400f	1700f	2100f	2400f	2800f	3100f	3450f	3800f	4250f	4800f	5400f
Poids approximatifs.	780k	900k	1200k	1400k	1800k	2000k	2250k	2700k	3200k	3600k	4400k

5° Chaudières à vapeur horizontales tubulaires à retour de flamme et foyer amovible, avec vaste réservoir d'eau et de vapeur et avec maçonnerie.

Puissance des chaudières en chevaux-vapeur.	5	7	10	12	15	20	25	35	45	55	65
Surface de chauffe, en mètres. Intérieure.	8m²,00	10m²,50	13m²,60	15m²,80	18m²,20	22m²,60	28m²,00	33m²,50	39m²,00	46m²,00	55m²,00
Surface de chauffe, en mètres. Extérieure.	4 ,50	6 ,00	7 ,60	8 ,40	10 ,00	11 ,20	12 ,50	15 ,60	18 ,40	21 ,50	23 ,50
Surface de chauffe, en mètres. Totale.	12 ,50	16 ,50	21 ,20	24 ,20	28 ,20	33 ,80	40 ,50	49 ,10	57 ,40	67 ,50	78 ,50
Prix des chaudières.	3000f	3600f	4100f	4600f	5300f	5800f	6500f	7400f	8200f	9500f	10500f
Poids approximatif	1800k	2400k	3000k	3600k	4200k	4800k	5800k	6800k	7660k	8500k	9400k
Prix approximatif de la maçonnerie, sans cheminée.	250f	300f	360f	400f	480f	580f	680f	800f	900f	1050f	1200f

6° Chaudières à vapeur horizontales, à deux bouilleurs latéraux et à foyer extérieur.

Puissance en chevaux-vapeur	8	10	12	15	20	25	30	35	40	50
Prix des chaudières	2280f	2680f	3050f	3600f	4550f	5500f	6500f	7450f	8400f	10400f
Surface de chauffe, en mètres carrés.	12m²,00	15m²,00	18m²,00	22m²,50	25m²,00	27m²,50	45m²,00	52m²,50	60m²,00	75m²,00
Capacité totale, en mètres cubes.	2m³,200	3m³,000	3m³,400	4m³,650	6m³,300	7m³,800	9m³,750	12m³,000	16m³,000	21m³,000
Poids approximatif.	2800k	3500k	4000k	5000k	6400k	8000k	9800k	11500k	13300k	17000k
Prix approximatif de la maçonnerie	500k	600f	750f	900f	1250f	1700f	2400f	3000f	3800f	4600f

766. Incrustation des chaudières à vapeur. Eau d'alimentation. Par suite de l'évaporation, les matières tenues en suspension ou en dissolution dans l'eau se déposent sur les parois de la chaudière (234). Le *tartre* solide qui en résulte nuit non seulement à la vaporisation, mais aussi à la conservation de la chaudière et de la machine; en effet, en outre qu'il diminue la transmission de la chaleur, il rend la chaudière plus sujette aux coups de feu, et, en pénétrant jusque dans le cylindre et le condenseur, il y forme des dépôts qui usent les parties frottantes. Une épaisseur de 3 à 4 millimètres de tartre solide adhérente aux parois de la chaudière peut réduire de 15 à 20 p. 100 la production de la vapeur.

Les sels que l'eau contient ordinairement en dissolution sont le carbonate et le sulfate de chaux.

Lorsque les dépôts sont en boue plus ou moins épaisse, on les enlève facilement en lavant la chaudière. Mais des eaux, même limpides, peuvent laisser déposer sur les parois de la chaudière un tartre cristallisé, que sa dureté rend très difficile à détacher, même avec le burin et le marteau; on conçoit l'importance qu'il y a d'éviter la formation de tels dépôts.

L'argile que l'eau contient quelquefois en suspension ne donne pas d'incrustations; elle a au contraire l'avantage d'empêcher l'adhérence des dépôts que forment les sels dissous.

Les moyens employés pour éviter les incrustations sont *chimiques*, *physigues* ou *mécaniques*.

Les *moyens chimiques* ont pour effet de précipiter immédiatement une partie des sels dissous. Ainsi un sel de soude précipite le carbonate de chaux, et la matière insoluble qui en résulte empêche l'adhérence à la manière de l'argile. On peut précipiter le sulfate de chaux avec la baryte; mais cette substance est assez coûteuse.

Moyens physiques ou mécaniques. En délayant avec soin dans l'eau, comme l'a proposé Pelouze en 1824, environ 1 kilog. d'argile par cheval pour quinze jours, cette argile s'interpose entre les cristaux et empêche l'incrustation. Mais comme l'argile est lourde, elle tombe au fond quand la chaudière est au repos, et à la reprise du feu il peut y avoir brûlure du métal. L'argile a le plus grave inconvénient d'être entraînée jusque dans la boîte à tiroir, le cylindre et le condenseur, dont elle use les parties frottantes.

Ce dernier inconvénient est plus grave encore avec le verre pilé, qu'on a proposé, et qui prévient bien les incrustations. Les coquilles d'huîtres ont paru donner un meilleur résultat. Les copeaux de fer, les rognures de tôle et les tessons de bouteilles peuvent prévenir les incrustations; mais ils sont difficiles à retirer de la chaudière, et l'on a à craindre encore que les petits fragments ne soient entraînés entre les parties frottantes plongées dans la vapeur.

La pomme de terre râpée, à raison de 1 litre environ par force de cheval et par mois, en lubrifiant en quelque sorte les parois de la chaudière, empêche les molécules salines d'y adhérer et aussi de faire

corps entre elles; mais il se produit à la surface de l'eau une mousse abondante qui augmente la quantité d'eau entraînée par la vapeur. La dextrine et l'amidon agissent à la manière de la pomme de terre, et ont comme elle l'inconvénient de rendre l'eau visqueuse. Le goudron de houille, qu'on dit employé en Amérique, agit sans doute aussi à la manière des corps précédents.

Une classe de corps anti-incrustants comprend le tan, le cachou, le chêne, les sarments de vigne, l'acajou, la plupart des bois de teinture, notamment le campêche, et en général toutes les matières contenant de l'acide tannique. Ces substances s'emploient, soit en nature, soit en sciure renfermée dans des sacs de toile, soit en décoction concentrée.

Une autre nature d'ingrédients, qui a donné lieu à une foule de recettes brevetées, comprend les compositions alcalines de soude et de potasse mélangées ordinairement de dextrine, d'amidon, d'acide tannique et d'acide chlorhydrique.

On a eu l'idée d'enduire de graisse la surface intérieure des chaudières marines; mais comme dans ces chaudières une partie de la cheminée se trouve dans la vapeur, la graisse peut se décomposer et donner naissance à de l'hydrogène carboné, et par suite à des explosions.

Babington a proposé de souder à l'intérieur de la chaudière une feuille de zinc égale en surface au 1/15 de la surface mouillée de la chaudière, de manière que les deux faces du zinc soient en contact avec l'eau. Il se produit, dit l'auteur, une action voltaïque très efficace pour empêcher les incrustations.

Holcroff et Hoyle ont disposé dans la chaudière, à 0^m,08 ou 0^m,10 du fond, un collecteur en tôle mince concentrique à ce fond. Le tartre se dépose sous forme de boue dans cet espèce d'auge où l'eau est suffisamment tranquille, et un robinet permet d'en faire la vidange. Comme cette auge rend le nettoyage de la chaudière difficile, M. Duméry la remplace par un vase métallique dans lequel un tuyau amène de l'eau prise dans la chaudière près de la surface liquide; par un autre tuyau l'eau se rend du vase dans l'un des bouilleurs. Comme l'eau dans son circuit éprouve un repos relatif dans le vase, elle y laisse les dépôts, qu'on enlève de temps en temps à l'aide d'un robinet placé au sommet du cône qui termine inférieurement le vase. Cet appareil est peu employé, et ne paraît présenter quelque avantage que pour les eaux très séléniteuses.

Enfin, M. Downe, ingénieur anglais, en découpant le bois d'eucalyptus en fines lamelles qu'il jette dans l'eau, obtient une décoction qui préserve les chaudières des incrustations.

Le moyen le plus sûr d'éviter les dépôts et les incrustations dans les chaudières est de faire usage d'eau pure pour l'alimentation. Si l'on n'en a pas naturellement dans la localité, on peut recueillir de l'eau de pluie.

La vapeur condensée dans les tuyaux de chauffage ou dans les condenseurs à surface est convenable pour l'alimentation des chaudières. On reproche cependant à l'eau distillée l'inconvénient d'attaquer les chaudières en produisant une sorte de vermoulure à la surface.

En se procurant une certaine quantité d'eau pure pour remplir la

chaudière et pour desservir le condenseur à injection pendant un certain temps, on peut se servir toujours de la même eau en la laissant refroidir à sa sortie du condenseur.

On peut encore se procurer de l'eau pure en purifiant celle qu'on a à sa disposition. Si l'eau n'est pas boueuse, par une filtration ou simplement par un séjour dans un réservoir, on la débarrasse suffisamment des corps en suspension pour éviter des dépôts trop rapides dans les chaudières.

Pour purifier l'eau des sels calcaires qu'elle contient en dissolution, M. Knabb y agite du lait de chaux ou de la baryte : le premier de ces corps pour précipiter les carbonates et le second les sulfates. Comme la manœuvre de l'agitateur et la précipitation demandent un certain temps, on emploie un double réservoir, que du reste on peut faire servir comme réservoir d'alimentation.

Comme en chauffant l'eau à 100° on précipite le carbonate de chaux et qu'en la chauffant à 140 ou 150° on précipite les autres sels de chaux, et entre autres le sulfate, M. Cousté a proposé d'utiliser cette propriété en plaçant dans le canal de fumée, à la suite de la chaudière, un cylindre métallique vertical terminé haut et bas par une calotte sphérique. M. Wagner fixe dans la hauteur du cylindre six vases métalliques équidistants ayant pour fond un cercle dont il manque un segment. Le segment de chaque vase correspond au côté opposé du vase placé immédiatement au-dessous; de sorte que le cylindre et les vases ayant le même diamètre, toute l'eau passe successivement sur tous les vases et y dépose les sels précipités, que l'on retire de temps à autre par des ouvertures latérales pratiquées dans les parois du cylindre. A la suite de l'appareil un filtre retient la plus grande partie des matières que l'eau peut encore contenir en suspension. Cet appareil, malgré ses bonnes dispositions, n'enlève guère que 50 p. 100 des matières dissoutes dans l'eau, et quelquefois beaucoup moins.

Dans les chaudières à tubes réchauffeurs (753), quoique l'eau prenne dans ces tubes une température à peu près égale à celle de la chaudière, une partie des sels n'en va pas moins se déposer dans cette dernière. Cela est dû à ce que l'eau ayant un certain mouvement dans les tubes, elle ne s'y dépouille pas entièrement des matières en suspension.

On réduit autant que possible l'accumulation des dépôts :

1° En empêchant l'eau de la chaudière de se saturer des sels qu'elle contient. Ce que l'on fait en donnant de temps en temps, par le robinet de vidange, qui puise au fond de la chaudière, écoulement à une certaine quantité d'eau, qu'on remplace par de l'eau foulée par l'appareil d'alimentation. (*Voir* Chaudières de bateaux à vapeur. *Troisième partie.*)

2° En évitant que les eaux fortement salines ne se refroidissent dans la chaudière. En marche, l'agitation s'oppose à la cristallisation, et les dépôts, qui ne sont que boueux, partent avec l'eau par le robinet de vidange.

3° En lavant souvent la chaudière. On lave les locomotives, en moyenne, tous les trois jours. Les chaudières de machines fixes ou marines, qui

sont simples à l'intérieur, se lavent tous les huit ou dix jours. La fréquence des lavages dépend du reste du degré d'impureté des eaux.

La marche à *retour d'eau* empêche les incrustations. Pour cela, on se sert constamment de la même eau, en n'ajoutant de temps en temps que la quantité nécessaire à combler les pertes qui surviennent.

M. Dulac dispose, dans l'eau du générateur, des récipients en tôle, de formes variées et mobiles, destinés à former des espaces tranquilles, où les sédiments s'accumulent par l'effet du remous. En ajoutant à l'eau les réactifs nécessaires (carbonate de soude, etc.), on provoque ces dépôts. On retire de temps en temps les collecteurs de dépôt et on les remet en place après les avoir vidés (761).

Enlèvement des incrustations. Quelles que soient les précautions prises, il se forme toujours des incrustations dans les chaudières. Si un ouvrier peut s'introduire dans la chaudière ou dans les bouilleurs, il les enlève assez facilement à l'aide du burin et du marteau. Dans le cas contraire, comme lorsqu'il s'agit de chaudières tubulaires, l'opération est beaucoup plus difficile, et parfois alors on a recours à l'un des deux moyens suivants, que l'on doit éviter autant que possible, surtout au point de vue de la conservation de la chaudière.

Le premier moyen consiste, quand la chaudière est vide et à peu près refroidie, à faire sur la grille un feu flambant avec des copeaux; le métal se dilate rapidement, les incrustations, qui ne peuvent pas suivre son mouvement, se détachent, et on les sort de la chaudière, ce qui n'est pas toujours facile.

Le deuxième moyen, dû à C. Polonceau, consiste d'abord à introduire du carbonate de soude dans la chaudière, et à y maintenir l'eau en ébullition pendant 12 ou 15 heures. Le sulfate de chaux s'est transformé en carbonate de chaux, que l'on dissout alors en ajoutant de l'acide chlorhydrique à l'eau de la chaudière.

767. Vapeur produite par 1 kilog. de combustible. La puissance calorifique de la houille moyenne étant 8000 (539), admettant que la vaporisation d'un kilog. d'eau absorbe 650 unités de chaleur (490), 1 kilog. de houille devrait produire $12^{kg},31$ de vapeur. Mais, dans la pratique, le charbon qui échappe à la combustion en tombant de la grille, le rayonnement perdu du foyer, le refroidissement des différentes parties du fourneau et la chaleur que la fumée emporte dans la cheminée, font qu'on est loin d'atteindre cette limite. Pour les chaudières ordinaires bien établies, l'eau d'alimentation étant à une faible température et la fumée se dégageant à 300°, 1 kilog. de houille ne produit que 6 à 7 kilog. de vapeur à la pression de 5 atmosphères environ; on va parfois au delà de 7 kilog. quand la pression de la vapeur est faible et qu'on chauffe l'eau d'alimentation à une certaine température; enfin il arrive encore souvent que, par suite de proportions peu convenables du foyer ou du fourneau ou d'une mauvaise conduite du feu, on n'obtient que 5 kilog. de vapeur par kilog. de houille (749).

On peut admettre que la vapeur produite par les différents combustibles est sensiblement proportionnelle à leurs puissances calorifiques;

alors, en adoptant la quantité 6^{kg},50 de vapeur pour 1 kilog. de houille moyenne, on aura pour 1 kilog. de divers combustibles les poids de vapeur produite du tableau suivant (508) :

	kil.		kil.
Bois sec.	3,25	Tourbe à 0,30 d'eau	3,00
Bois à 0,25 d'eau.	2,44	Charbon de tourbe à 0,20 de cendres.	5,20
Charbon de bois.	5,69	Houille moyenne	6,50
Tannée sèche	2,76	Coke à 0,05 de cendres	6,17
Tannée à 0,30 d'eau	1,95	Coke à 0,125 de cendres	5,69
Tourbe sèche à 0,05 de cendres . .	4,30		

767 *bis*. Surchauffage de la vapeur. De récents essais faits en Alsace par M. Walter-Meunier sur une machine à enveloppe de vapeur auraient montré que l'emploi de la surchauffe peut procurer une sérieuse économie dans la machine à vapeur. Le surchauffeur employé est celui de Uhler connu depuis 1866.

On a augmenté la température d'une vapeur à 5^{kg},07 et à 5^{kg},24 de 95°,50 à 110°; et une augmentation de 36°,20 et 44° existait encore au bout d'une conduite de vapeur de 22 mètres de long.

La puissance totale indiquée et le nombre de tours ayant été identiques dans quatre essais consécutifs, on a reconnu que la dépense de vapeur par cheval indiqué et par heure était de 12^{kg},7 et 12^{kg},8 sans la surchauffe, et respectivement de 9,30 et 8,40 avec la surchauffe.

L'économie de vapeur est de 26 à 30 p. 100, celle du charbon de 22 à 26 p. 100.

Un autre essai fait sur une machine compound horizontale à tiroirs, de 300 chevaux indiqués, alimentée avec de la vapeur à 6^{kg},5, a donné une économie de 20 p. 100 en vapeur, 16 p. 100 en charbon.

La mise en marche est rendue plus facile; l'huile de graissage est d'un prix un peu plus élevé, mais on en consomme moins; les garnitures doivent être métalliques; la visite n'a révélé aucune existence de paillettes de fer.

768. Décret du 1er mai 1880, relatif aux appareils à vapeur autres que ceux qui sont placés à bord des bateaux.

Art. 1er. — Sont soumis aux formalités et aux mesures prescrites par le présent règlement : 1° les générateurs de vapeur autres que ceux qui sont placés à bord des bateaux; 2° les récipients définis ci-après (Titre V).

TITRE Ier.

MESURES DE SURETÉ RELATIVES AUX CHAUDIÈRES PLACÉES A DEMEURE.

Art. 2. — Aucune chaudière neuve ne peut être mise en service qu'après avoir subi l'épreuve réglementaire ci-après définie. Cette épreuve doit être faite chez le constructeur et sur sa demande.

Toute chaudière venant de l'étranger est éprouvée, avant sa mise en service, sur le point du territoire français désigné par le destinataire dans sa demande.

Art. 3. — Le renouvellement de l'épreuve peut être exigé de celui qui fait usage d'une chaudière :

1° Lorsque la chaudière, ayant déjà servi, est l'objet d'une nouvelle installation ;
2° Lorsqu'elle a subi une réparation notable ;
3° Lorsqu'elle est remise en service après un chômage prolongé.

A cet effet, l'intéressé devra informer l'ingénieur des mines de ces diverses circonstances. En particulier, si l'épreuve exige la démolition du massif du fourneau ou l'enlèvement de l'enveloppe de la chaudière et un chômage plus ou moins prolongé, cette épreuve pourra ne point être exigée, lorsque des renseignements authentiques sur l'époque et les résultats de la dernière visite, intérieure et extérieure, constitueront une présomption suffisante en faveur du bon état de la chaudière. Pourront être notamment considérés comme renseignements probants les certificats délivrés aux membres des associations de propriétaires d'appareils à vapeur par celle de ces associations que le ministre aura désignée.

Le renouvellement de l'épreuve est exigible également lorsque, à raison des conditions dans lesquelles une chaudière fonctionne, il y a lieu par l'ingénieur des mines d'en suspecter la solidité.

Dans tous les cas, lorsque celui qui fait usage d'une chaudière contestera la nécessité d'une nouvelle épreuve, il sera, après une instruction où celui-ci sera entendu, statué par le préfet.

En aucun cas, l'intervalle entre deux épreuves consécutives n'est supérieur à dix années. Avant l'expiration de ce délai, celui qui fait usage d'une chaudière à vapeur doit lui-même demander le renouvellement de l'épreuve.

Art. 4. — L'épreuve consiste à soumettre la chaudière à une pression hydraulique supérieure à la pression effective qui ne doit point être dépassée dans le service. Cette pression d'épreuve sera maintenue pendant le temps nécessaire à l'examen de la chaudière, dont toutes les parties doivent pouvoir être visitées.

La surcharge d'épreuve, par centimètre carré, est égale à la pression effective, sans jamais être inférieure à un demi-kilogramme ni supérieure à 6 kilogrammes.

L'épreuve est faite sous la direction de l'ingénieur des mines et en sa présence, ou, en cas d'empêchement, en présence du garde-mine opérant d'après ses instructions.

Elle n'est pas exigée pour l'ensemble d'une chaudière dont les diverses parties, éprouvées séparément, ne doivent être réunies que par des tuyaux placés sur tout leur parcours, en dehors du foyer et des conduits de flamme, et dont les joints peuvent être facilement démontés.

Le chef de l'établissement où se fait l'épreuve fournit la main-d'œuvre et les appareils nécessaires à l'opération.

Art. 5. — Après qu'une chaudière ou partie de chaudière a été éprouvée avec succès, il y est apposé un timbre, indiquant, en kilogrammes par centimètre carré, la pression effective que la vapeur ne doit pas dépasser.

Les timbres sont poinçonnés et reçoivent trois nombres indiquant le jour, le mois et l'année de l'épreuve.

Un de ces timbres est placé de manière à être toujours apparent après la mise en place de la chaudière.

Art. 6. — Chaque chaudière est munie de deux soupapes de sûreté, chargées de manière à laisser la vapeur s'écouler dès que sa pression effective atteint la limite maximum indiquée par le timbre réglementaire.

L'orifice de chacune des soupapes doit suffire à maintenir, celle-ci étant au besoin convenablement déchargée ou soulevée et quelle que soit l'activité du feu, la vapeur dans la chaudière à un degré de pression qui n'excède, pour aucun cas, la limite ci-dessus.

Le constructeur est libre de répartir, s'il le préfère, la section totale d'écoulement nécessaire des deux soupapes réglementaires entre un plus grand nombre de soupapes.

Art. 7. — Toute chaudière est munie d'un manomètre en bon état, placé en vue du chauffeur et gradué de manière à indiquer, en kilogrammes, la pression effective de la vapeur dans la chaudière.

Une marque très apparente indique sur l'échelle du manomètre la limite que la pression effective ne doit pas dépasser.

La chaudière est munie d'un ajutage terminé par une bride de $0^m,04$ de diamètre et $0^m,005$ d'épaisseur, disposée pour recevoir le manomètre vérificateur.

Art. 8. — Chaque chaudière est munie d'un appareil de retenue, soupape ou clapets,

fonctionnant automatiquement et placé au point d'insertion du tuyau d'alimentation qui lui est propre (1).

Art. 9. — Chaque chaudière est munie d'une soupape ou d'un robinet d'arrêt de vapeur, placé autant que possible, à l'origine du tuyau de vapeur, sur la chaudière même.

Art. 10. — Toute paroi en contact par une de ses faces avec la flamme doit être baignée par l'eau sur sa face opposée.

Le niveau de l'eau doit être maintenu, dans chaque chaudière à une hauteur de marche telle qu'il soit, en toute circonstance, à $0^m,06$ au moins au-dessus du plan pour lequel la condition précédente cesserait d'être remplie. La position limite sera indiquée, d'une manière très apparente, au voisinage du tube de niveau mentionné à l'article suivant.

Les prescriptions énoncées au précédent article ne s'appliquent point :

1° Aux surchauffeurs de vapeur distincts de la chaudière ;

2° A des surfaces relativement peu étendues et placées de manière à ne jamais rougir, même lorsque le feu est poussé à son maximum d'activité, telles que les tubes ou parties de cheminées qui traversent le réservoir de vapeur, en envoyant directement à la cheminée principale les produits de la combustion.

Art. 11. — Chaque chaudière est munie de deux appareils indicateurs du niveau de l'eau, indépendants l'un de l'autre, et placés en vue de l'ouvrier chargé de l'alimentation.

L'un de ces deux indicateurs est un tube en verre, disposé de manière à pouvoir être facilement nettoyé et remplacé au besoin.

Pour les chaudières verticales de grande hauteur, le tube en verre est remplacé par un appareil disposé de manière à reporter, en vue de l'ouvrier chargé de l'alimentation, l'indication du niveau de l'eau dans la chaudière.

TITRE II.

ÉTABLISSEMENT DES CHAUDIÈRES A VAPEUR PLACÉES A DEMEURE.

Art. 12. — Toute chaudière à vapeur destinée à être employée à demeure ne peut être mise en service qu'après une déclaration adressée, par celui qui fait usage du générateur, au préfet du département (2). Cette déclaration est enregistrée à sa date. Il en est donné acte. Elle est communiquée sans délai à l'ingénieur en chef des mines (3).

Art. 13. — La déclaration fait connaître avec précision :

1. Le nom et le domicile du vendeur de la chaudière ou l'origine de celle-ci ;
2. La commune et le lieu où elle est établie ;
3. La forme, la capacité et la surface de chauffe ;
4. Le numéro du timbre réglementaire ;
5. Un numéro distinctif de la chaudière, si l'établissement en possède plusieurs ;
6. Enfin, le genre d'industrie et l'usage auquel elle est destinée.

Art. 14. — Les chaudières sont divisées en trois catégories.

Cette classification est basée sur le produit de la multiplication du nombre exprimant en mètres cubes la capacité totale de la chaudière (avec ses bouilleurs et ses réchauffeurs alimentaires, mais sans y comprendre les surchauffeurs de vapeur) par le nombre exprimant, en degrés centigrades, l'excès de la température de l'eau correspondant à la pression indiquée par le timbre réglementaire, sur la température de 100 degrés, conformément à la table annexée au présent décret (p. 980).

Si plusieurs chaudières doivent fonctionner ensemble dans un même emplacement, et si elles ont entre elles une communication quelconque, directe ou indirecte, on

(1) Il faut observer que le fonctionnement des soupapes de retenue n'est pas absolument sûr ; il arrive quelquefois qu'elles fuient ou restent levées, en sorte que la sécurité résultant de cette disposition n'est pas complète.

(2) A Paris, au préfet de police (art. 41).

(3) L'administration exige que la déclaration soit remise en deux exemplaires, dont un sur papier timbré. Elle exige une déclaration distincte pour chaque chaudière.

prend, pour former le produit, comme il vient d'être dit, la somme des capacités de ces chaudières.

Les chaudières sont de la première catégorie quand le produit est plus grand que 200 ; de la deuxième, quand le produit n'excède pas 200, mais surpasse 50 ; de la troisième, si le produit n'excède pas 50.

Art. 15. — Les chaudières comprises dans la première catégorie doivent être établies en dehors de toute maison d'habitation et de tout atelier surmonté d'étages. N'est pas considérée comme un étage, au-dessus de l'emplacement d'une chaudière, une construction dans laquelle ne se fait aucun travail nécessitant la présence d'un personnel à poste fixe.

Art. 16. — Il est interdit de placer une chaudière de première catégorie à moins de 3 mètres d'une maison d'habitation.

Lorsqu'une chaudière de première catégorie est placée à moins de 10 mètres d'une maison d'habitation, elle en est séparée par un mur de défense.

Ce mur, en bonne et solide maçonnerie, est construit de manière à défiler la maison par rapport à tout point de la chaudière distant de moins de 10 mètres, sans toutefois que sa hauteur dépasse de 1 mètre la partie la plus élevée de la chaudière. Son épaisseur est égale au tiers au moins de sa hauteur, sans que cette épaisseur puisse être inférieure à 1 mètre en couronne. Il est séparé du mur de la maison voisine par un intervalle libre de 30 centimètres de largeur au moins.

L'établissement d'une chaudière de première catégorie à la distance de 10 mètres au plus d'une maison d'habitation n'est assujetti à aucune condition particulière.

Les distances de 3 mètres et de 10 mètres, fixées ci-dessus, sont réduites respectivement à 1^{m},50 et à 5 mètres, lorsque la chaudière est enterrée de façon que la partie supérieure de ladite chaudière se trouve à 1 mètre en contre-bas du sol du *côté* de la maison voisine.

Art. 17. — Les chaudières comprises dans la deuxième catégorie peuvent être placées dans l'intérieur de tout atelier, pourvu que l'atelier ne fasse pas partie d'une maison d'habitation.

Les foyers sont séparés des murs des maisons voisines par un intervalle libre de 1 mètre au moins.

Art. 18. — Les chaudières de troisième catégorie peuvent être établies dans un atelier quelconque, même lorsqu'il fait partie d'une maison d'habitation.

Les foyers sont séparés des murs des maisons voisines par un intervalle libre de 0^{m},50 au moins.

Art. 19. — Les conditions d'emplacement prescrites pour les chaudières à demeure, par les précédents articles, ne sont pas applicables aux chaudières pour l'établissement desquelles il aura été satisfait au décret du 25 janvier 1865, antérieurement à la promulgation du présent règlement.

Art. 20. — Si, postérieurement à l'établissement d'une chaudière, un terrain contigu vient à être affecté à la construction d'une maison d'habitation, celui qui fait usage de la chaudière devra se conformer aux mesures prescrites par les articles 16, 17 et 18, comme si la maison eût été construite avant l'établissement de la chaudière.

Art. 21. — Indépendamment des mesures générales de sûreté prescrites au titre Ier, et de la déclaration prévue par les articles 12 et 13, les chaudières à vapeur fonctionnant dans l'intérieur des mines sont soumises aux conditions que pourra prescrire le préfet, suivant les cas et sur le rapport de l'ingénieur des mines.

TITRE III.

CHAUDIÈRES LOCOMOBILES.

Art. 22. — Sont considérées commes locomobiles les chaudières à vapeur qui peuvent être transportées facilement d'un lieu dans un autre, n'exigeant aucune construction pour fonctionner sur un point donné, et ne sont employées que d'une manière temporaire à chaque station.

Art. 23. — Les dispositions des articles 2 à 11 inclusivement du présent décret sont applicables aux chaudières locomobiles.

Art. 24. — Chaque chaudière porte une plaque sur laquelle sont gravés, en carac-

tères très apparents, le nom et le domicile du propriétaire et un numéro d'ordre, si ce propriétaire possède plusieurs chaudières locomobiles.

Art. 25. — Elle est l'objet de la déclaration prescrite par les articles 12 et 13. Cette déclaration est adressée au préfet du département où est le domicile du propriétaire.

L'ouvrier chargé de la conduite devra présenter à toute réquisition le récépissé de cette déclaration.

TITRE IV.

CHAUDIÈRES DES MACHINES LOCOMOTIVES.

Art. 26. — Les machines à vapeur locomotives sont celles qui, sur terre, travaillent en même temps qu'elles se déplacent par leur propre force, telles que les machines des chemins de fer et des tramways, les machines routières, les rouleaux compresseurs, etc.

Art. 27. — Les dispositions des articles 2 à 8 inclusivement et celles des articles 11 et 24 sont applicables aux chaudières des machines locomotives.

Art. 28. — Les dispositions de l'article 25, paragraphe 1er, s'appliquent également à ces chaudières.

Art. 29. — La circulation des machines locomotives a lieu dans les conditions déterminées par des règlements spéciaux.

TITRE V.

RÉCIPIENTS.

Art. 30. — Sont soumis aux dispositions suivantes les récipients de formes diverses, d'une capacité de plus de 100 litres, au moyen desquels les matières à élaborer sont chauffées, non directement à feu nu, mais par de la vapeur empruntée à un générateur distinct, lorsque leur communication avec l'atmosphère n'est point établie par des moyens excluant toute pression effective nettement appréciable.

Art. 31. — Ces récipients sont assujettis à la déclaration prescrite par les articles 12 et 13.

Ils sont soumis à l'épreuve, conformément aux articles 2, 3, 4 et 5. Toutefois, la surcharge d'épreuve sera, dans tous les cas, égale à la moitié de la pression maximum à laquelle l'appareil doit fonctionner, sans que cette surcharge puisse excéder 4 kilogrammes par centimètre carré.

Art. 32. — Ces récipients sont munis d'une soupape de sûreté réglée pour la pression indiquée par le timbre, à moins que cette pression ne soit égale ou supérieure à celle fixée pour la chaudière alimentaire.

L'orifice de cette soupape, convenablement déchargée ou soulevée au besoin, doit suffire à maintenir, pour tous les cas, la vapeur dans le récipient à un degré de pression qui n'excède pas la limite du timbre.

Elle peut être placée, soit sur le récipient lui-même, soit sur le tuyau d'arrivée de la vapeur, entre le robinet et le récipient.

Art. 33. — Les dispositions des articles 30, 31 et 32 s'appliquent également aux réservoirs dans lesquels de l'eau à haute température est emmagasinée, pour fournir ensuite un dégagement de vapeur ou de chaleur, quel qu'en soit l'usage.

Art. 34. — Un délai de six mois, à partir de la promulgation du présent décret, est accordé pour l'exécution des quatre articles qui précèdent.

TITRE VI.

DISPOSITIONS GÉNÉRALES.

Art. 35. — Le ministre peut, sur le rapport des ingénieurs des mines, l'avis du préfet et celui de la commission centrale des machines à vapeur, accorder dispense de tout ou partie des prescriptions du présent décret, dans tous les cas où, à raison soit de la forme, soit de la faible dimension des appareils, soit de la position spéciale des pièces contenant de la vapeur, il serait reconnu que la dispense ne peut pas avoir d'inconvénient.

Art. 36. — Ceux qui font usage de générateurs ou de récipients de vapeur veilleront à ce que ces appareils soient entretenus constamment en bon état de service.

A cet effet, ils tiendront la main à ce que des visites complètes, tant à l'intérieur qu'à l'extérieur, soient faites à des intervalles rapprochés, pour constater l'état des appareils et assurer l'exécution, en temps utile, des réparations ou remplacements nécessaires.

Ils devront informer les ingénieurs des réparations notables faites aux chaudières et aux récipients, en vue de l'exécution des articles 3 (1°, 2° et 3°) et 31, § 2.

Art. 37. — Les contraventions au présent règlement sont constatées, poursuivies et réprimées conformément aux lois.

Art. 38. — En cas d'accident ayant occasionné la mort ou des blessures, le chef de l'établissement doit prévenir immédiatement l'autorité chargée de la police locale et l'ingénieur des mines chargé de la surveillance. L'ingénieur se rend sur les lieux, dans le plus bref délai, pour visiter les appareils, en constater l'état et rechercher les causes de l'accident. Il rédige sur le tout :

1° Un rapport qu'il adresse au procureur de la République et dont une expédition est transmise à l'ingénieur en chef, qui fait parvenir son avis à ce magistrat ;

2° Un rapport qui est adressé au préfet, par l'intermédiaire et avec l'avis de l'ingénieur en chef.

En cas d'accident n'ayant occasionné ni mort ni blessures, l'ingénieur des mines seul est prévenu, il rédige un rapport qu'il envoie, par l'intermédiaire et avec l'avis de l'ingénieur en chef, au préfet.

En cas d'explosion, les constructions ne doivent point être réparées et les fragments de l'appareil rompu ne doivent point être déplacés ou dénaturés avant la constatation de l'état des lieux par l'ingénieur.

Art. 39. — Par exception, le ministre pourra confier la surveillance des appareils à vapeur aux ingénieurs ordinaires et aux conducteurs des ponts et chaussées, sous les ordres de l'ingénieur en chef des mines de la circonscription.

Art. 40. — Les appareils à vapeur qui dépendent des services spéciaux de l'État sont surveillés par les fonctionnaires et agents de ces services.

Art. 41. — Les attributions conférées aux préfets des départements par le présent décret sont exercées par le préfet de police dans toute l'étendue de son ressort.

Art. 42. — Est rapporté le décret du 25 janvier 1865.

Table donnant la température (en degrés centigrades) de l'eau correspondant à une pression donnée (en kilogrammes effectifs).

VALEURS CORRESPONDANTES		VALEURS CORRESPONDANTES		VALEURS CORRESPONDANTES	
de la pression effective en kilogrammes.	de la température en degrés centigrades.	de la pression effective en kilogrammes.	de la température en degrés centigrades.	de la pression effective en kilogrammes.	de la température en degrés centigrades.
0,5	111	7,5	173	14,5	199
1,0	120	8,0	175	15,0	200
1,5	127	8,5	177	15,5	202
2,0	133	9,0	179	16,0	203
2,5	138	9,5	181	16,5	205
3,0	143	10,0	183	17,0	206
3,5	147	10,5	185	17,5	208
4,0	151	11,0	187	18,0	209
4,5	155	11,5	189	18,5	210
5,0	158	12,0	191	19,0	211
5,5	161	12,5	193	19,5	213
6,0	164	13,0	194	20,0	214
6,5	167	13,5	196		
7,0	170	14,0	197		

769. Emploi de plusieurs générateurs groupés sur une conduite générale de vapeur. Clapets de retenue. (Décret du 29 juin 1886.)

Art. 1er. — Lorsque plusieurs générateurs de vapeur, placés à demeure, sont groupés sur une conduite générale de vapeur, en nombre tel que le produit, formé comme il est dit à l'article 14 du décret du 30 avril 1880, en prenant comme base du calcul le timbre réglementaire le plus élevé, dépasse le nombre 1800, lesdits générateurs sont répartis par séries correspondant chacune à un produit au plus égal à ce nombre ; chaque série est munie d'un clapet automatique d'arrêt, disposé de façon à éviter, en cas d'explosion, le déversement de la vapeur des séries restées intactes.

Art. 2. — Lorsqu'un générateur de première catégorie est chauffé par les flammes perdues d'un ou plusieurs fours métallurgiques, tout le courant des gaz chauds doit, en arrivant au contact des tôles, être dirigé tangentiellement aux parois de la chaudière.

A cet effet, si les rampants destinés à amener les flammes ne sont pas construits de façon à assurer ce résultat, les tôles exposées aux coups de feu sont protégées, en face des débouchés des rampants dans les carneaux, par des murettes en matériaux réfractaires, distantes des tôles d'au moins 50 millimètres, et suffisamment étendues dans tous les sens pour que les courants de gaz chauds prennent des directions sensiblement tangentielles aux surfaces des tôles voisines, avant de les toucher.

Art. 3. — Les dispositions de l'article 35 du décret du 30 avril 1880 sont applicables aux prescriptions du présent règlement.

770. Loi du 21 juillet 1856 concernant les contraventions aux règlements sur les appareils et bateaux à vapeur.

TITRE Ier.

DES CONTRAVENTIONS RELATIVES A LA VENTE DES APPAREILS A VAPEUR.

Art. 1er. — Est puni d'une amende de cent à mille francs tout fabricant qui a livré une chaudière fermée, ou toute autre pièce destinée à produire de la vapeur, sans qu'elle ait été soumise aux épreuves exigées par les règlements d'administration publique.

Est puni de la même peine le fabricant qui, après avoir fait dans ses ateliers des changements ou des réparations notables à une chaudière, ou à toute autre pièce destinée à produire de la vapeur, l'a rendue au propriétaire sans qu'elle ait été de nouveau soumise auxdites épreuves.

Art. 2. — Est puni d'une amende de vingt-cinq à deux cents francs tout fabricant qui a livré un cylindre, une enveloppe de cylindre, ou une pièce quelconque destinée à contenir de la vapeur, sans que cette pièce ait été soumise aux épreuves prescrites par lesdits règlements (1).

TITRE II.

DES CONTRAVENTIONS RELATIVES A L'USAGE DES APPAREILS A VAPEUR ÉTABLIS AILLEURS QUE SUR LES BATEAUX.

Art. 3. — Est puni d'une amende de vingt-cinq à cinq cents francs quiconque a fait usage d'une machine ou chaudière à vapeur sur laquelle ne seraient pas appliqués les timbres constatant qu'elle a été soumise aux épreuves et vérifications prescrites par les règlements d'administration publique.

Est puni de la même peine quiconque, après avoir fait faire à une chaudière ou partie de chaudière des changements ou réparations notables, a fait usage de la chaudière modifiée ou réparée sans en avoir donné avis au préfet ou sans qu'elle ait été soumise de nouveau, dans le cas où le préfet l'aurait ordonné, à la pression d'épreuve correspondante au numéro du timbre dont elle est frappée (2).

Art. 4. — Est puni d'une amende de vingt-cinq à cinq cents francs quiconque a

(1) Cet article n'est plus applicable qu'en partie.
(2) Ceci est modifié par suite du décret de 1880.

fait usage d'un appareil à vapeur sans être muni de l'autorisation exigée par les règlements d'administration publique (1).

L'amende est de cent à mille francs, si l'appareil à vapeur dont il a été fait usage sans autorisation n'est pas revêtu des timbres mentionnés en l'article précédent.

Néanmoins, l'amende n'est point encourue si, dans le délai de deux mois pour les appareils à placer dans l'intérieur des établissements, et de trois mois pour les appareils placés en dehors, il n'a pas été statué par l'administration sur l'autorisation demandée.

Art. 5. — Celui qui continue à se servir d'un appareil à vapeur pour lequel l'autorisation a été retirée ou suspendue en vertu des règlements d'administration publique, est puni d'une amende de cent à deux mille francs, et peut être condamné, en outre, à un emprisonnement de trois jours à un mois.

Art. 6. — Quiconque fait usage d'un appareil à vapeur autorisé sans s'être conformé aux prescriptions qui lui ont été imposées en vertu desdits règlements, en ce qui concerne les appareils de sûreté dont les chaudières doivent être pourvues et l'emplacement de ces chaudières, ou qui continue à en faire usage alors que les appareils de sûreté et les dispositions de local ont cessé de satisfaire à ces prescriptions, est puni d'une amende de vingt-cinq à deux cents francs.

Art. 7. — Le chauffeur ou mécanicien qui a fait fonctionner une machine ou chaudière à une pression supérieure au degré déterminé dans l'acte d'autorisation, ou qui a surchargé les soupapes d'une chaudière, faussé ou paralysé les autres appareils de sûreté, est puni d'une amende de vingt-cinq à cinq cents francs, et peut être, en outre, condamné à un emprisonnement de trois jours à un mois.

Le propriétaire, le chef de l'entreprise, le directeur, le gérant ou le préposé par les ordres duquel a eu lieu la contravention prévue au présent article, est puni d'une amende de cent à deux mille francs, et peut être condamné à un emprisonnement de six jours à deux mois.

TITRE III.

DES CONTRAVENTIONS RELATIVES AUX BATEAUX A VAPEUR ET AUX APPAREILS A VAPEUR PLACÉS SUR CES BATEAUX.

Art. 8. — Est puni d'une amende de cent à deux mille francs tout propriétaire ou chef d'entreprise qui a fait naviguer un bateau à vapeur sans un permis de navigation délivré par l'autorité administrative, conformément aux règlements d'administration publique.

Art. 9. — Le propriétaire ou chef d'entreprise qui a continué de faire naviguer un bateau à vapeur dont le permis a été suspendu ou retiré en vertu desdits règlements encourt une amende de quatre cents à quatre mille francs, et peut être condamné, en outre, à un emprisonnement d'un mois à un an.

Art. 10. — Est puni d'une amende de quatre cents à quatre mille francs tout propriétaire de bateau à vapeur ou chef d'entreprise qui fait usage d'une chaudière non revêtue des timbres constatant qu'elle a été soumise aux épreuves prescrites par les règlements d'administration publique, ou qui, après avoir fait faire à une chaudière ou partie de chaudière des changements ou réparations notables, a fait usage, hors le cas de force majeure, de la chaudière réparée ou modifiée sans qu'elle ait été soumise à la pression d'épreuve correspondante au numéro du timbre dont elle est frappée.

Art. 11. — Est puni d'une amende de deux cents à quatre mille francs tout propriétaire de bateau à vapeur ou chef d'entreprise qui, après avoir obtenu un permis de navigation, fait naviguer ce bateau sans se conformer aux prescriptions qui lui ont été imposées en vertu des règlements d'administration publique en ce qui concerne les appareils de sûreté dont les chaudières doivent être pourvues, l'emplacement des chaudières et machines, et les séparations entre cet emplacement et les salles destinées aux passagers.

La même peine est applicable dans le cas où le bateau a continué à naviguer après

(1) La formalité de l'autorisation a été depuis réduite à une simple déclaration. (Voir le décret de 1880, page 977.)

que les appareils de sûreté ou les dispositions du local ont cessé de satisfaire à ces prescriptions.

Art. 12. — Est puni d'une amende de deux cents à deux mille francs tout propriétaire de bateau à vapeur ou chef d'entreprise qui a confié la conduite du bateau ou de l'appareil moteur à un capitaine ou à un mécanicien non pourvu des certificats de capacité exigés par les règlements d'administration publique.

Art. 13. — Est puni d'une amende de cinquante à cinq cents francs le capitaine d'un bateau à vapeur si, par suite de sa négligence :

1° La pression de la vapeur dans les chaudières a été portée au-dessus de la limite fixée par le permis de navigation ;

2° Les appareils prescrits, soit pour limiter ou indiquer cette pression, soit pour indiquer le niveau de l'eau dans l'intérieur des chaudières, soit pour alimenter d'eau les chaudières, ont été faussés ou paralysés.

Art. 14. — Est puni d'une amende de cinquante à cinq cents francs, et, en outre, d'un emprisonnement de trois jours à trois mois, le mécanicien ou chauffeur qui, sans ordre, a surchargé les soupapes, faussé ou paralysé les autres appareils.

Lorsque la surcharge des soupapes a eu lieu, hors du cas de force majeure, par l'ordre du capitaine ou du chef de manœuvre qui le remplace, le capitaine ou le chef de manœuvre qui a donné l'ordre est puni d'une amende de deux cents à deux mille francs, et peut être condamné à un emprisonnement de six jours à deux mois.

Art. 15. — Est puni d'une amende de vingt-cinq à deux cent cinquante francs, et d'un emprisonnement de trois jours à un mois, le mécanicien d'un bateau à vapeur qui aura laissé descendre l'eau dans la chaudière au niveau des conduits de la flamme et de la fumée.

Art. 16. — Est puni d'une amende de cinquante à cinq cents francs le capitaine d'un bateau à vapeur qui a contrevenu aux dispositions des règlements d'administration publique, ou des arrêtés des préfets rendus en vertu de ces règlements, en ce qui concerne :

1° Le nombre des passagers qui peuvent être reçus à bord ;

2° Le nombre et la nature des embarcations, agrès et apparaux dont le bateau doit être pourvu ;

3° Les prescriptions relatives aux embarquements et débarquements, et celles qui ont pour objet d'éviter les accidents au départ, aux passages sous les ponts ou à l'arrivée des bateaux, ou de prévenir les abordages.

Art. 17. — Dans le cas où, par inobservation des règlements, le capitaine d'un bateau à vapeur a heurté, endommagé ou mis en péril un autre bateau, il est puni d'une amende de cinquante à cinq cents francs, et peut être condamné, en outre, à un emprisonnement de six jours à trois mois.

Art. 18. — Le propriétaire du bateau à vapeur, le chef d'entreprise ou le gérant par les ordres de qui a lieu l'un des faits prévus par les articles 13, 14 et 16 de la présente loi est passible de peines doubles de celles qui, conformément auxdits articles, seront appliquées à l'auteur de la contravention.

TITRE IV

DISPOSITIONS GÉNÉRALES.

Art. 19. — En cas de récidive, l'amende et la durée de l'emprisonnement peuvent être élevées au double du maximum porté dans les articles précédents.

Il y a récidive lorsque le contrevenant a subi, dans les douze mois qui précèdent, une condamnation en vertu de la présente loi.

Art. 20. — Si les contraventions prévues dans les titres II et III de la présente loi ont occasionné des blessures, la peine sera de huit jours à six mois d'emprisonnement et l'amende de cinquante à mille francs ; si elles ont occasionné la mort d'une ou plusieurs personnes, l'emprisonnement sera de six mois à cinq ans, et l'amende de trois cents à mille francs.

Art. 21. — Les contraventions prévues par la présente loi sont constatées par les ingénieurs des mines, les ingénieurs des ponts et chaussées, les gardes-mines, les conducteurs et autres employés des ponts et chaussées et des mines, commissionnés à cet effet, les maires et adjoints, les commissaires de police, et, en outre, pour les

bateaux à vapeur, les officiers de port, les inspecteurs et gardes de la navigation, les membres des commissions de surveillance instituées en exécution des règlements, et les hommes de l'art qui, dans les ports étrangers, auront, en vertu de l'article 49 de l'ordonnance du 17 janvier 1846, été chargés par les consuls ou agents consulaires français de procéder aux visites des bateaux à vapeur.

Art. 22. — Les procès-verbaux dressés en exécution de l'article précédent sont visés pour timbre et enregistrés en débet.

Ceux qui ont été dressés par des agents de surveillance et gardes assermentés doivent, à peine de nullité, être affirmés dans les trois jours devant le juge de paix ou le maire, soit du lieu du délit, soit de la résidence de l'agent.

Lesdits procès-verbaux font foi jusqu'à preuve contraire.

Les procès-verbaux qui ont été dressés dans les ports étrangers, par les hommes de l'art désignés en l'article 21 ci-dessus, sont enregistrés à la chancellerie du consulat et envoyés en originaux au ministre des travaux publics, afin que les poursuites soient exercées devant les tribunaux compétents.

Art. 23. — L'article 463 du Code pénal est applicable aux condamnations prononcées en exécution de la présente loi.

771. Appelant, comme à la page 652 :

N la pression absolue de la vapeur en atmosphères, c'est-à-dire le numéro du timbre d'après l'ancienne ordonnance du 22 mai 1843 ;
$n = N - 1$ la pression effective de la vapeur en atmosphères ;
P la pression absolue de la vapeur en kilogrammes par centimètre carré ;
$p = P - 1{,}03329$ la pression effective de la vapeur en kilogrammes par centimètre carré, c'est-à-dire le numéro du timbre d'après les décrets du 25 janvier 1865 et du 1er mai 1880 :

$$N = \frac{p}{1{,}03329} + 1.$$

Relation à l'aide de laquelle, connaissant le numéro p du timbre actuel, on peut calculer le numéro N du timbre ancien qu'on aurait placé sur la même chaudière, ou réciproquement. Le tableau page 652 contient les valeurs de N correspondant à celles de p, d'après cette relation.

— Les coefficients de résistance et d'élasticité des chaudières doivent donner toute sécurité pour les pressions extrêmes auxquelles elles sont soumises.

Le tableau suivant que nous empruntons au *Dictionnaire de l'Industrie et des arts industriels*, de E.-O. Lami, indique ces coefficients pour les divers métaux employés dans la construction des chaudières.

MATIÈRES.	COEFFICIENTS R de résistance.		COEFFICIENTS d'élasticité E.
	Traction.	Compression.	
TÔLE DE FER :	kil.	kil.	
Qualité commune	4,0 par millim. car.	4,0	kil. 17500 par millim. car.
Fer demi-fort	6,0	6,0	
Fer fort	6,5	6,5	
Fer fort supérieur	7,0	7,0	
Cuivre rouge laminé écroui	5,5	5,0	10700
— recuit	2,2	1,9	10700
Fonte de fer	1,1	4,0	10000
Fonte de bronze	1,9	»	6400

772. Épaisseur des chaudières. L'effort qui tend à rompre une chaudière à vapeur suivant une génératrice par millimètre de longueur est exprimé par $\frac{10pD}{2}$, et l'on a :

$$\frac{10pD}{2} = eR, \quad \text{d'où} \quad e = \frac{10pD}{2R}.$$

p pression effective de la vapeur en kilogrammes par centimètre carré de surface de la chaudière ;
D diamètre de la chaudière en mètres ;
e épaisseur de la chaudière en millimètres ;
R résistance à la traction du métal qui compose la chaudière, par millimètre carré de section (p. 415 et 423).

Cette formule est la même que celle posée au n° 202 pour les tuyaux de conduite des eaux ; seulement la hauteur h en mètres d'eau est exprimée en kilogrammes sur 1 centimètre carré de surface, ce qui donne $h = 10p$.

L'effort qui tend à rompre une chaudière suivant les cercles de sections droites est $\frac{10pD}{4}$, et l'on a :

$$\frac{10pD}{4} = eR, \quad \text{d'où} \quad e = \frac{10pD}{4R}.$$

D'après l'ordonnance du 22 mai 1843, l'épaisseur des chaudières à vapeur en tôle et en cuivre était déterminée à l'aide de la formule :

$$e = 1{,}8D(N-1) + 3, \quad \text{d'où} \quad N = 1 + \frac{e-3}{1{,}8D}. \qquad (a)$$

N tension absolue de la vapeur dans la chaudière, en atmosphères, ou numéro du timbre. Les numéros des timbres ne croissaient que par quart d'atmosphère.

DIAMÈTRES des chaudières.	NUMÉROS DES TIMBRES exprimant les tensions absolues de la vapeur dans la chaudière.						
	2 atmosph.	3 atmosph.	4 atmosph.	5 atmosph.	6 atmosph.	7 atmosph.	8 atmosph.
mèt.	millim.	millim.	millim.	millim.	millim.	millim.	millim.
0,50	3,90	4,80	5,70	6,60	7,50	8,40	9,30
0,55	3,99	4,98	5,97	6,96	7,95	8,94	9,93
0,60	4,08	5,16	6,24	7,32	8,40	9,48	10,56
0,65	4,17	5,34	6,51	7,68	8,85	10,02	11,19
0,70	4,26	5,52	6,78	8,04	9,30	10,56	11,82
0,75	4,35	5,70	7,05	8,40	9,75	11,10	12,45
0,80	4,44	5,88	7,32	8,76	10,20	11,64	13,08
0,85	4,53	6,06	7,59	9,12	10,65	12,18	13,71
0,90	4,62	6,24	7,86	9,48	11,10	12,72	14,34
0,95	4,71	6,42	8,13	9,84	11,55	13,26	14,97
1,00	4,80	6,60	8,40	10,20	12,00	13,80	15,60
1,05	4,89	6,78	8,67	10,56	12,45	14,34	16,23
1,10	4,98	6,96	8,94	10,92	12,90	14,88	16,86
1,15	5,07	7,14	9,21	11,28	13,25	15,42	17,49
1,20	5,16	7,32	9,48	11,64	13,80	15,96	18,12

Une instruction ministérielle du 17 décembre 1848 exigeait, dans le cas où la chaudière est pressée du dehors en dedans, que l'épaisseur donnée aux tôles fût une fois et demie celle qui résulte de cette formule.

De la première formule (a) on conclut les épaisseurs e des chaudières cylindriques en tôle ou en cuivre laminé, consignées dans le tableau précédent.

Comme on a (771) :

$$N = \frac{p}{1,033\,29} + 1,$$

p étant la pression effective en kilogrammes par centimère carré, c'est-à-dire le numéro du timbre d'après les décrets du 25 janvier 1865 et du 1er mai 1880,

substituant dans la première formule (a), il vient :

$$e = 1,8\,D\,\frac{p}{1,033\,29} + 3, \quad \text{d'où} \quad p = (e - 3)\,\frac{1,033\,29}{1,8\,D}. \qquad (a')$$

De la première formule (a') on conclut les épaisseurs e des chaudières cylindriques en tôle ou en cuivre laminé, consignées dans le tableau (p. 987).

Comme on a sensiblement $N = p + 1$, dans la pratique on peut considérer l'épaisseur d'une chaudière comme étant la même pour les pressions absolues N de 2, 3, 4, ... atmosphères que pour les pressions effectives p de 1, 2, 3, 4, ... kilog. par centimètre carré.

D'après l'ancienne ordonnance, l'épaisseur de la tôle ou du cuivre laminé ne devait d'ailleurs jamais dépasser 15 millimètres; si, en raison du diamètre projeté de la chaudière et de la tension de la vapeur, une épaisseur plus forte était nécessaire, le fabricant devait substituer à une chaudière unique plusieurs chaudières séparées de diamètres plus petits.

Les épaisseurs de la tôle devaient être augmentées s'il s'agissait de chaudières formées, en partie ou en totalité, de faces planes, ou bien de conduits intérieurs, cylindriques ou autres, traversant l'eau ou la vapeur, et servant soit de foyers, soit à la circulation de la flamme. Ces chaudières et conduits devaient, de plus, être, suivant le cas, renforcés par des armatures suffisantes.

L'ordonnance n'assignait pas non plus de règle pour l'épaisseur des chaudières en fonte ; mais, d'après l'instruction annexée à l'ordonnance, on devait considérer comme suspecte toute chaudière en fonte de forme cylindrique dont l'épaisseur n'était pas égale à 5 fois l'épaisseur prescrite pour la même chaudière en tôle ou en cuivre laminé.

Comme dans le commerce on ne trouve pas des tôles de toutes les épaisseurs, les constructeurs de chaudières ne faisaient usage que de tôles d'un certain nombre d'épaisseurs, mais qui devaient toujours être supérieures à celles que prescrivait l'ordonnance.

Pour de fortes pressions intérieures, on applique la formule de Lamé (397).

DIAMÈTRES des chaudières.	NUMÉROS DES TIMBRES ou pressions effectives p de la vapeur en kilogrammes par centimètre carré.									
	0,25	0,50	0,75	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00
mèt.	mill.	mill.	mill.	mill.	mill.	mill.	mill	mill.	mill.	mill.
0,40	3,47	3,35	3,52	3,70	4,05	4,39	4,74	5,09	5,44	5,79
0,45	3,20	3,39	3,59	3,78	4,18	4,57	4,96	5,35	5,74	6,14
0,50	3,22	3,44	3,65	3,87	4,31	4,74	5,18	5,61	6,05	6,48
0,55	3,24	3,48	3,72	3,96	4,44	4,92	5,40	5,87	6,35	6,83
0,60	3,26	3,52	3,78	4,05	4,57	5,09	5,61	6,14	6,66	7,18
0,65	3 28	3,57	3,85	4,13	4,70	5,26	5,83	6,40	6,96	7,53
0,70	3,30	3,61	3,91	4,22	4,83	5,44	6,05	6 66	7,27	7,88
0,75	3,33	3,65	3,98	4,31	4,96	5,61	6,27	6,92	7,57	8,23
0,80	3,35	3,70	4,05	4,39	5,09	5,79	6,48	7,18	7,88	8,57
0,85	3,37	3,74	4,11	4,48	5,22	5,96	6,70	7,44	8,18	8,92
0,90	3,39	3,78	4,18	4,57	5,35	6,14	6,92	7,70	8,49	9 27
0,95	3,41	3,83	4,24	4,66	5,48	6,31	7,14	7,96	8,79	9,62
1,00	3,44	3,87	4,31	4,74	5,61	6,48	7,36	8,23	9,10	9,97
1,05	3,46	3,91	4,37	4,83	5,74	6,66	7,57	8,49	9,40	10,32
1,10	3,48	3,96	4,44	4,92	5,87	6,83	7,79	8,75	9,71	10,66
1,15	3,50	4,00	4,50	5,00	6,00	7,01	8,01	9 01	10,01	11,01
1,20	3,52	4,05	4,57	5,09	6,14	7,18	8,23	9,27	10,32	11,36
1,25	3,54	4,09	4,63	5,18	6,27	7,36	8,44	9,53	10,62	11,71
1,30	3,57	4,13	4,70	5,27	6,40	7,53	8,66	9,79	10,93	12,06
1,35	3,59	4,18	4,76	5,35	6,53	7,70	8,88	10,06	11,23	12,41
1,40	3,61	4,22	4,83	5,44	6,66	7,88	9,10	10,32	11,54	12,76
1,45	3,63	4,26	4,89	5,53	6,79	8,05	9,32	10,58	11,84	13,10
1,50	3,65	4,31	4,96	5,61	6,92	8,23	9,53	10,84	12,15	13,45

DIAMÈTRES des chaudières.	4,50	5,00	5,50	6,00	6,50	7,00	7,50	8,00	8,50	9,00
mèt.	mill.	mill.	mill.	mill.	mill.	mill.	mill.	mill.	mill.	mill.
0,40	6,14	6,48	6,83	7,18	7,53	7,88	8,23	8,57	8,92	9,27
0,45	6,53	6,92	7,31	7,70	8,10	8,49	8,88	9,27	9,66	10,06
0.50	6,92	7,36	7,79	8,23	8,66	9,10	9,53	9,97	10,40	10,84
0,55	7,31	7,79	8,27	8,75	9,23	9,71	10,19	10,66	11,14	11,62
0,60	7,70	8,23	8,75	9,27	9,79	10,32	10,84	11,36	11,88	12,41
0,65	8,10	8,66	9,23	9,79	10,36	10,93	11,49	12,06	12,62	13,19
0,70	8,49	9,10	9,71	10,32	10,93	11,54	12,15	12,76	13,37	13,97
0,75	8,88	9,53	10,19	10,84	11,49	12,15	12,80	13,45	14,11	14,76
0,80	9,27	9,97	10,66	11,36	12,06	12,76	13,45	14,15	14,85	15,54
0,85	9,66	10,40	11,14	11,88	12,62	13,36	14,10	14,85	15,59	16,33
0,90	10,05	10,84	11,62	12,41	13,19	13,97	14,76	15,54	16,33	17,11
0,95	10,45	11,27	12,10	12,93	13,76	14,58	15 41	16,24	17,07	17,89
1,00	10,84	11,71	12,58	13,45	14,32	15,19	16,07	16,94	17,81	18,68
1,05	11,23	12,15	13,06	13,97	14,89	15,80	16,72	17,63	18,55	19,46
1,10	11,62	12,58	13,54	14,50	15,46	16,41	17,37	18,33	19,29	20,25
1,15	12 01	13,02	14,02	15,02	16,02	17,02	18,02	19,03	20,03	21,03
1,20	12,41	13,45	14,50	15,54	16,59	17,63	18,68	19.72	20,77	21,81
1,25	12,80	13,89	14,98	16,07	17,15	18,24	19,33	20,42	21,51	22,60
1,30	13,19	14,32	15,46	16,59	17,72	18,85	19 98	21,12	22,25	23,38
1,35	13,58	14,76	15,93	17,11	18,29	19,46	20,64	21,81	22,99	24,17
1,40	13,97	15,19	16,41	17,63	18.85	20.07	21,29	22,51	23,73	24,95
1,45	14,37	15,63	16,89	18,16	19,42	20,68	21,94	23,21	24,47	25,73
1,50	14,76	16,07	17,37	18,68	19,98	21,29	22,60	23,90	25,21	26,52

Tableau des dimensions des chaudières adoptées dans un des principaux établissements de Paris. La saillie *s* est celle des bouilleurs en avant du corps de la chaudière.

	FORCE en chevaux.	CHAUDIÈRES.		BOUILLEURS.			ÉPAISSEUR DES TÔLES.					
							4 atmosph.		5 atmosph.		6 atmosph.	
		Diamètre.	Longueur.	Diamètre.	Longueur.	Saillie *s*.	Chaud.	Bouill.	Chaud.	Bouill.	Chaud.	Bouill.
		m.	m.	m.	m.	m.	mill.	mill.	mill.	mill.	mill.	mill.
	1	0,55	2,35	»	»	»	7,5	»	8,5	»	9,5	»
1 bouilleur.	2	0,50	1,75	0,40	1,95	0,45	6	6,5	6.5	7,5	7,5	8
	3	0,50	2.65	0,40	2,85	0,45	6	6,5	6,5	7,5	7,5	8
	4	0,60	2,60	0,50	2,75	0,45	6,5	7	7,5	8	8,5	9
	6	0,70	3,50	0,50	3,65	0,50	7	7	8	8	9,5	9
	8	0,70	4 40	0,50	4,55	0,50	7	7	8	8	9,5	9
	10	0,80	4,70	0,60	4,86	0,56	7,5	8	9	9	10	10
	12	0,80	5,60	0,60	5,76	0,56	7,5	8	9	9	10	10
	15	0,80	6,00	0,50	4.90	0,80	7,5	7	9	8	10	9
2 bouilleurs.	20	0,80	6,00	0,50	6,53	0,93	7,5	7	9	8	10	9
	30	1,00	7,45	0,55	7,88	0,93	8,5	7,5	10	8,5	12	9,5
	35	1,00	8,75	0,55	9,18	0,93	8,5	7,5	10	8,5	12	9,5
	40	1,23	8,50	0,60	8,885	1,00	9,5	8	12	9	14	10
	45	1,23	9.60	0,60	9,985	1,00	9,5	8	12	9	14	10
	50	1,23	10,25	0,60	10,685	1,05	9,5	8	12	9	14	10

De ce tableau il résulte que la surface de chauffe par cheval est environ 2^{mq} pour les très petites machines, $1^{mq},50$ pour celles de 10 chevaux, $1^{mq},40$ pour celles de 20, et $1^{mq},20$ pour celles de 50 (749).

Afin de faciliter le passage de la fumée du carneau inférieur dans le carneau supérieur, l'extrémité postérieure de la chaudière dépasse de $0^{m},25$ à $0^{m},35$ celle des bouilleurs.

Une circulaire ministérielle adressée aux préfets, en date du 22 mars 1853, prohibait l'usage des calottes en fonte pour former l'extrémité des bouilleurs qui est en contact avec la flamme ou les gaz provenant de la combustion. L'emploi de la fonte ne pouvait être permis que pour la fermeture autoclave de l'extrémité extérieure et apparente des bouilleurs, et pour les tubulures qui réunissent les bouilleurs au corps des chaudières.

773. Épreuves des chaudières. D'après l'ordonnance de 1843, aucune chaudière à vapeur ne pouvait être mise en activité sans avoir été préalablement essayée, à l'aide d'une pompe foulante à eau, à une pression triple de la pression effective N — 1 (771), pour les chaudières, tubes bouilleurs et réservoirs en tôle ou en cuivre laminé, et quintuple pour les chaudières ou tubes bouilleurs en fonte.

Les cylindres en fonte des machines à vapeur et les enveloppes en fonte de ces cylindres étaient éprouvés à une pression triple de la pression effective.

Les chaudières qui avaient des surfaces planes étaient dispensées de l'épreuve, mais sous la condition que la force élastique ou la tension

de la vapeur ne devrait pas s'élever, dans l'intérieur de ces chaudières, à plus d'une atmosphère et demie.

Les décrets de 1865 et de 1880 ont modifié les épreuves précédentes, non seulement sous le rapport des pressions sous lesquelles elles doivent être faites, mais aussi sous celui des pièces qui y sont soumises (page 976).

On procède à l'épreuve des chaudières en chargeant leurs soupapes de poids convenables. Lorsqu'une chaudière est pourvue de deux soupapes, il convient de caler l'une d'elles pendant l'épreuve, de manière qu'elle ne puisse pas se soulever, et de charger l'autre.

Il est à désirer que les chaudières composées de plusieurs parties distinctes, comme les chaudières à bouilleurs, soient essayées toutes les parties assemblées; mais il n'y a pas lieu d'exiger que l'épreuve soit toujours faite de cette manière à la fabrique, parce que les chaudières qui doivent être placées dans des établissements éloignés sont généralement séparées en plusieurs parties, pour rendre leur transport plus facile, et ne sont montées et définitivement assemblées qu'après l'arrivée à destination.

Ainsi le fabricant peut présenter à l'épreuve la chaudière en pièces séparées. Le corps de la chaudière est alors essayé en chargeant une soupape adaptée à la chaudière même; pour les bouilleurs, on se sert comme soupape d'épreuve de celle qui est adaptée à la pompe de pression; dans ce cas, les tuyaux qui mettent la pompe en communication avec la pièce à essayer doivent être libres d'obstructions.

Le poids déterminé pour chaque cas étant suspendu au levier de la soupape d'épreuve, on foule l'eau avec célérité dans la chaudière à éprouver, jusqu'à ce que la soupape se soulève. L'épreuve n'est regardée comme concluante et comme terminée que quand l'eau jaillit en nappe mince et à peu près continue sur le pourtour entier de l'orifice de la soupape; car si celle-ci était mal ajustée, il pourrait s'échapper des filets d'eau sur quelques points du contour, bien avant que la pression d'épreuve eût été atteinte.

Pendant la durée de l'épreuve, l'ingénieur examine avec soin si la pièce éprouvée n'a pas de fuites, et si les parois ne se sont pas déformées par la pression. Quelques légers suintements entre les feuilles de tôle ou même à travers les pores du métal d'une chaudière ne sont point un motif suffisant pour regarder la pièce éprouvée comme défectueuse. Ces suintements, qui se manifestent assez fréquemment, avant même que la pression intérieure ait atteint la limite fixée par la charge des soupapes, peuvent être arrêtés par quelques coups de marteau. Des fissures dans le métal, par lesquelles aurait lieu une fuite un peu forte, une déformation sensible qui ne disparaîtrait pas aussitôt que l'épreuve est terminée, sont les signes auxquels on reconnaît une chaudière défectueuse. C'est principalement aux déformations qu'on doit faire attention dans l'épreuve des chaudières qui sont à parois planes, ou concaves extérieurement, ou qui contiennent des tuyaux cylindriques pour la circulation de la flamme.

Quand la pièce a convenablement supporté l'épreuve, l'ingénieur fait frapper devant lui, d'un timbre portant l'empreinte fixée par l'administration, une plaque ou médaille en cuivre sur laquelle est gravé le nombre de kilog. par centimètre carré mesurant la pression effective de la vapeur, et qui a été fixée d'avance à la chaudière éprouvée au moyen de vis en cuivre. L'empreinte est apposée sur la tête des vis arasées préalablement à fleur de la plaque. Elle s'étend en partie sur le métal de cette plaque.

Il est possible qu'une chaudière qui a bien résisté à la pression présente cependant, en raison de sa forme et du mode de jonction de ses parties, des vices de construction qui peuvent devenir des causes de danger. A cet égard, une chaudière est surtout défectueuse :

1° Lorsqu'il n'est pas possible de la nettoyer complètement des sédiments vaseux ou incrustants que les eaux, même réputées les plus pures, abandonnent dans son intérieur en se vaporisant (766);

2° Lorsque les communications existant entre les bouilleurs, ou parties de la chaudière qui sont exposées le plus directement à l'action du feu, et l'espace occupé par la vapeur, sont trop étroites ou non disposées pour que la vapeur formée dans l'intérieur des bouilleurs puisse s'en dégager facilement pour arriver dans le réservoir de vapeur;

3° Lorsque les joints des tubulures qui mettent en communication les diverses parties de la chaudière ne présentent pas une solidité suffisante, ou lorsque cette solidité peut être détruite accidentellement.

Ainsi, par exemple, le mastic de fer dont on se sert quelquefois pour garnir les joints des tubulures de communication entre les bouilleurs et la chaudière, quoiqu'il puisse résister à la pression d'épreuve, ne doit pas être regardé comme établissant entre les deux pièces réunies une jonction suffisamment solide pour résister indéfiniment à la pression de la vapeur. Ce mastic a d'abord l'inconvénient d'attaquer le fer sur lequel il est appliqué; c'est pourquoi on ne doit en faire usage que pour des tubulures épaisses en fonte de fer, et non pour des tubulures en tôle. Il est, en outre, cassant, et son adhérence, qui est fort énergique, peut être détruite accidentellement par le déplacement de la chaudière ou par un choc. Il est donc indispensable, quand on s'en sert, que les pièces assemblées soient, en outre, réunies par des armatures en fer suffisamment fortes pour prévenir à elles seules la disjonction dans le cas même où l'adhérence due au mastic serait entièrement détruite (591).

Malgré les vices de construction que l'ingénieur peut remarquer, il fait timbrer les chaudières qui ont résisté à l'épreuve; mais il a soin de signaler ces vices au procès-verbal.

774. Soupapes de sûreté. Il est adapté à la partie supérieure de chaque chaudière deux soupapes de sûreté, une vers chaque extrémité de la chaudière (744). Chaque soupape est chargée d'un poids agissant, soit directement, soit par l'intermédiaire d'un levier; il convient que ce poids soit unique.

La charge maximum Π de chaque soupape de sûreté est déterminée

par la formule :

$$\Pi = 1{,}03329\,(N-1)\,\frac{\pi d^2}{4} = p\,\frac{\pi d^2}{4}.$$

$N-1$ pression effective de la vapeur en atmosphères (771);
$p = 1{,}03329\,(N-1)$, pression effective de la vapeur en kilog. par centimètre carré;
d diamètre de l'orifice de la soupape en centimètres.

Négligeant l'influence de la surface annulaire de contact de la soupape sur son siège, surface sur laquelle agit la pression atmosphérique extérieure et non la vapeur, Π' étant le poids propre de la soupape, le poids Q qu'il faut appliquer sur cette soupape est :

$$Q = \Pi - \Pi'.$$

Si l'on fait usage d'un levier, on détermine la pression Π' du levier non chargé sur la soupape. Pour cela on fixe, au point du levier qui repose sur la soupape, l'extrémité d'un fil vertical passant sur une petite poulie très mobile sur son axe, et l'on suspend à l'autre extrémité de ce fil un poids suffisant pour soulever le levier mis en place; ce poids est égal à Π''.

Connaissant Π, Π' et Π'', le poids q qu'il faut appliquer à l'extrémité du levier pour faire équilibre à la pression de la vapeur est, en négligeant le frottement de l'axe du levier et l'influence de la surface de contact de la soupape sur son siège :

$$q = \frac{(\Pi - \Pi' - \Pi'')\,l}{L}.$$

L bras de levier du poids q; c'est la longueur totale du levier, ou mieux la distance du point d'application de q à l'axe d'articulation du levier;
l distance de l'axe d'articulation du levier au point où il s'appuie sur la soupape; c'est le bras de levier de $\Pi - \Pi' - \Pi''$.

D'après l'ordonnance du 22 mai 1843, la largeur de la surface annulaire de recouvrement ne devait pas dépasser la 1/30 partie du diamètre de la surface circulaire exposée directement à la pression de la vapeur, et cette largeur, dans aucun cas, ne devait excéder 2 millimètres.

Le diamètre de la partie exposée directement à la vapeur étant, en millimètres :

20 25 30 35 40 45 50 55 60 et au-dessus,

la largeur maximum en millimètres de la surface annulaire de contact était respectivement :

0,67 0,83 1,00 1,17 1,32 1,50 1,67 1,83 2,00.

Le diamètre des soupapes de sûreté était donné par la formule :

$$d = 2{,}6\sqrt{\frac{s}{N-0{,}412}}. \qquad (a)$$

d diamètre de la soupape en centimètres ;

s surface de chauffe de la chaudière, y compris les parties de parois situées dans les carneaux ou conduits de la flamme et de la fumée, exprimée en mètres carrés (749);

N numéro du timbre (772).

SURF. DE CHAUFFE des chaudières.	NUMÉROS DES TIMBRES indiquant les tensions absolues de la vapeur dans les chaudières.									
	1 ½ atmos.	2 atmos.	2 ½ atmos.	3 atmos.	3 ½ atmos.	4 atmos.	4 ½ atmos.	5 atmos.	5 ½ atmos.	6 atmos.
m.car.	cent.	cent.	cent.	cent.	cent.	cent.	cent.	cent.	cent.	cent.
1	2,493	2,063	1,799	1,616	1,479	1,372	1,286	1,214	1,152	1,100
2	3,525	2,918	2,544	2,286	2,092	1,941	1,818	1,716	1,630	1,555
3	4,317	3,573	3,116	2,799	2,563	2,377	2,227	2,102	1,996	1,905
4	4,985	4,126	3,598	3,232	2,959	2,745	2,572	2,427	2,305	2,200
5	5,574	4,613	4,023	3,614	3,308	3,069	2,875	2,714	2,578	2,459
6	6,106	5,054	4,407	3,958	3,624	3,362	3,149	2,973	2,823	2,694
7	6,595	5,458	4,760	4,276	3,914	3,631	3,402	3,211	3,045	2,910
8	7,050	5,835	5,089	4,571	4,185	3,882	3,637	3,433	3,260	3,111
9	7,478	6,189	5,398	4,848	4,438	4,117	3,857	3,641	3,458	3,299
10	7,882	6,524	5,690	5,110	4,679	4,340	4,066	3,838	3,645	3,478
11	8,267	6,843	5,967	5,360	4,907	4,552	4,265	4,025	3,823	3,648
12	8,635	7,147	6,233	5,598	5,125	4,754	4,454	4,204	3,993	3,810
13	8,987	7,439	6,487	5,827	5,334	4,949	4,636	4,376	4,156	3,965
14	9,325	7,720	6,732	6,047	5,536	5,138	4,811	4,541	4,312	4,124
15	9,654	7,990	6,968	6.259	5,730	5,316	4,980	4,701	4,464	4,259
16	9,970	8,253	7,197	6,464	5,918	5,490	5,143	4,854	4,610	4,399
17	10,277	8,506	7,418	6,663	6,100	5,659	5,302	5,004	4,752	4,534
18	10,575	8,753	7,633	6.841	6,277	5,823	5,455	5,149	4,890	4,666
19	10,865	8,993	7,842	7,044	6,449	5,982	5,605	5,290	5,024	4,794
20	11,147	9,227	8,046	7,227	6,616	6,138	5,750	5,428	5,154	4,918
21	11,423	9,454	8,245	7,380	6,780	6,289	5,892	5,561	5,282	5,040
22	11,691	9,677	8,439	7,580	6,939	6,437	6,031	5,692	5,406	5,158
23	11,954	9,894	8,629	7,750	7,095	6,582	6,167	5,820	5,527	5,274
24	12,211	10,107	8,814	7,917	7,248	6,723	6,299	5,845	5,646	5,388
25	12,463	10,316	8,996	8,080	7,397	6,862	6,429	6,069	5,763	5,499
26	12,710	10,520	9,174	8,240	7,544	6,998	6,556	6,188	5,877	5,608
27	12,952	10,720	9,349	8,397	7,776	7,132	6,681	6,306	5,989	5,715
28	13,190	10,917	9,520	8,551	7,828	7,262	6,804	6,422	6,099	5,819
29	13,423	11,110	9,689	8,703	7,967	7,391	6,924	6,535	6,207	5,922
30	13,653	11.300	9,855	8,851	8,103	7,517	7,043	6,648	6,313	6,024

Si, d'après les décrets de 1865 et de 1880, le numéro du timbre exprime la pression effective p en kilogrammes par centimètre carré on a (772) :

$$N = \frac{p}{1,03329} + 1.$$

Substituant dans la formule (a) et réduisant, il vient :

$$d = 2,6429\sqrt{\frac{s}{p + 0,60757}}. \qquad (a')$$

De cette formule (a'), *on conclut pour les diamètres* d *des soupapes*, en centimètres, les résultats du tableau suivant :

SURFACES de chauffe des chaudières.	NUMÉROS DES TIMBRES ou pressions effectives p de la vapeur dans les chaudières en kilogrammes par centimètre carré.																	
	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50	2,75	3,00	3,25	3,50	3,75	4,00	4,25	4,50
m. carrés.	cent.	cent.	cent.	cent.	cent.	cent.	cent.	cent.	cent.	cent.	cent.	cent.	cent.	cent.	cent.	cent.	cent.	cent.
1	2,854	2,511	2,268	2,084	1,939	1,820	1,721	1,637	1,563	1,499	1,442	1,391	1,346	1,304	1,266	1,231	1,199	1,169
2	4,036	3,552	3,208	2,948	2,742	2,575	2,434	2,315	2,211	2,120	2,040	1,968	1,903	1,844	1,790	1,741	1,696	1,654
3	4,943	4,350	3,929	3,610	3,359	3,153	2,981	2,835	2,708	2,597	2,498	2,410	2,331	2,259	2,193	2,133	2,077	2,026
4	5,710	5,023	4,537	4,169	3,878	3,641	3,443	3,273	3,127	2,998	2,885	2.783	2,691	2,608	2,532	2,462	2,398	2,339
5	6,384	5,615	5,072	4,661	4,336	4,071	3,849	3,660	3,496	3,352	3,225	3,111	3,009	2,916	2,831	2,753	2,681	2,615
6	6,994	6,151	5,556	5,106	4,750	4,459	4,216	4,009	3,830	3,672	3,533	3,408	3,296	3,194	3,101	3.016	2,937	2,865
7	7,551	6,644	6,001	5,515	5,130	4,817	4,554	4,330	4,136	3,967	3,816	3,681	3,560	3,450	3,350	3,257	3,173	3,094
8	8,072	7,103	6,416	5,896	5,485	5,149	4,868	4,629	4,422	4,240	4,080	3,936	3,806	3,688	3,581	3,442	3,392	3,308
9	8,562	7,534	6,805	6.253	5,817	5,461	5,164	4,910	4,690	4,498	4,327	4,174	4,037	3,912	3,798	3,694	3,597	3,508
10	9,025	7,941	7,173	6,592	6,132	5,757	5,443	5,176	4,944	4,741	4,561	4,400	4,255	4,124	4,004	3,894	3,792	3,698
11	9,466	8,329	7,523	6,913	6,431	6,038	5,709	5,428	5,185	4,972	4,784	4,615	4,463	4,325	4,199	4,084	3,977	3,879
12	9,886	8,699	7,858	7,221	6,717	6,306	5,963	5,670	5,416	5,194	4,996	4,820	4,661	4,517	4,386	4,265	4,154	4,051
13	10,290	9,055	8,178	7,516	6,992	6,564	6,206	5,901	5,637	5,406	5,200	5,017	4,852	4,702	4,565	4,439	4,324	4,216
14	10,678	9,396	8,487	7,799	7,256	6,812	6,440	6,124	5,850	5,610	5,397	5,206	5,035	4,879	4,737	4,607	4,487	4,376
15	11,053	9,726	8,785	8,073	7,510	7,051	6,666	6,339	6,055	5,807	5,586	5,389	5,212	5,050	4,903	4,769	4,644	4,529
16	11,416	10,045	9,073	8,338	7,757	7,282	6,885	6,547	6,254	5,997	5,769	5,566	5,382	5,216	5,064	4,925	4,797	4,678
17	11,767	10,354	9,352	8,594	7,995	7,506	7,097	6,748	6,446	6,182	5,947	5,737	5,548	5,377	5,220	5,077	4,944	4,822
18	12,108	10,654	9,624	8,844	8,227	7,724	7,303	6,944	6,633	6,361	6,119	5,904	5,709	5,532	5,371	5,224	5,088	4,961
19	12,440	10,947	9,887	9,086	8,452	7,935	7,503	7,134	6,815	6,535	6,287	6,065	5,865	5,684	5,519	5,367	5,227	5,097
20	12,763	11,231	10,144	9,322	8,672	8,142	7,698	7,319	6,992	6,705	6,450	6,223	6,018	5,832	5,662	5,506	5,363	5,230
21	13,078	11,508	10,395	9,552	8,886	8,342	7,888	7,500	7,165	6,870	6,610	6,377	6,166	5,976	5,802	5,642	5,495	5,359
22	13.386	11,779	10,639	9,777	9,095	8,539	8,073	7,676	7,333	7,032	6,765	6,527	6,312	6,116	5,938	5,775	5,624	5,435
23	13,687	12,044	10,878	9,997	9,300	8,731	8,255	7,849	7,498	7,190	6,917	6,673	6,453	6,254	6,072	5,905	5,751	5,608
24	13.981	12,303	11,112	10.212	9,500	8,919	8,432	8,018	7,659	7,345	7,066	6,817	6,592	6,388	6,202	6,032	5,874	5,729
25	14,270	12,556	11,342	10,422	9,696	9,102	8,606	8,183	7,817	7,496	7,212	6,957	6,728	6,520	6,330	6,156	5,996	5,847
26	14.552	12,805	11,566	10,629	9,888	9,283	8,777	8,345	7,972	7,645	7,355	7,095	6,861	6,649	6,456	6,278	6,114	5,963
27	14,830	13,049	11,786	10,831	10,076	9,460	8,944	8,504	8,124	7,790	7.495	7,230	6,992	6,776	6,579	6,398	6,231	6,076
28	15,102	13,288	12,003	11,030	10,261	9,633	9,108	8,660	8,273	7,933	7,632	7,363	7,120	6,900	6,699	6,515	6,345	6,188
29	15,369	13,524	12,215	11,225	10,443	9,804	9,269	8,814	8,419	8,074	7,767	7,493	7,246	7,022	6,818	6,630	6,458	6,298
30	15,632	13,755	12,424	11,417	10,621	9,971	9,428	8,964	8,563	8,212	7,900	7,621	7,370	7,142	6,935	6,744	6,568	6,405
31	15,890	13,982	12,629	11,606	10,797	10,136	9,584	9,113	8,705	8,347	8,031	7,747	7,492	7,260	7,049	6,855	6,677	6,511
32	16,144	14,206	12,831	11,792	10,969	10,298	9,737	9,258	8,844	8,481	8,159	7,871	7,612	7,377	7,162	6,965	6,783	6,615
33	16,395	14,426	13,030	11,975	11,140	10,458	9,888	9,402	8,981	8,612	8,286	7,993	7,730	7,491	7,273	7,073	6,889	6,718
34	16,641	14,643	13,226	12,154	11,307	10,615	10,037	9,543	9,116	8,742	8,410	8,114	7,846	7,604	7,382	7,179	6,992	6,819
35	16,884	14,857	13,419	12,332	11,472	10,770	10,183	9,683	9,249	8,870	8,533	8,232	7,961	7,715	7,490	7,284	7,094	6,918
36	17,124	15,068	13,610	12,507	11,635	10,923	10,328	9,820	9,381	8,995	8,654	8,349	8,074	7,824	7,596	7,387	7,195	7,017
37	17,360	15,275	13,798	12,679	11,795	11,074	10,470	9,956	9,510	9,120	8,773	8,464	8,185	7,932	7,701	7,489	7,294	7,113
38	17,593	15,481	13,983	12,849	11,954	11,222	10,611	10,089	9,638	9,242	8,891	8,578	8,295	8,039	7,805	7,590	7,392	7,209
39	17,823	15,683	14,165	13,018	12,110	11,369	10,749	10,221	9,764	9,363	9,007	8,690	8,403	8,144	7,907	7,689	7,489	7,303
40	18,050	15,883	14,346	13,183	12,264	11,514	10,886	10,351	9,888	9,482	9,122	8,800	8,510	8,247	8,007	7,787	7,584	7,396

SURFACES de chauffe des chaudières.	NUMÉROS DES TIMBRES ou pressions effectives *p* de la vapeur dans les chaudières en kilogrammes par centimètre carré.																	
	4,75	5,00	5,25	5,50	5,75	6,00	6,25	6,50	6,75	7,00	7,25	7,50	7,75	8,00	8,25	8,50	8,75	9,00
m. carrés.	cent.	cent.	cent.	cent.	cent.	cent.	cent.	cent.	cent.	cent.	cent.	cent.	cent.	cent.	cent.	cent.	cent.	cent.
1	1,142	1,116	1,092	1,069	1,048	1,028	1,009	0,991	0,974	0,958	0,943	0,928	0,914	0,901	0,888	0,876	0,864	0,853
2	1,615	1,578	1,544	1,512	1,482	1,454	1,427	1,402	1,378	1,355	1,333	1,313	1,293	1,274	1,256	1,238	1,222	1,206
3	1,978	1,933	1,891	1,852	1,815	1,781	1,748	1,717	1,688	1,660	1,633	1,608	1,583	1,560	1,538	1,517	1,496	1,477
4	2,284	2,232	2,184	2,139	2,096	2,056	2,018	1,983	1,949	1,916	1,886	1,856	1,828	1,802	1,776	1,751	1,728	1,705
5	2,553	2,496	2,442	2,391	2,344	2,299	2,257	2,217	2,179	2,143	2,108	2,075	2,044	2,014	1,986	1,958	1,932	1,907
6	2,797	2,734	2,675	2,620	2,568	2,518	2,472	2,428	2,387	2,347	2,309	2,274	2,239	2,207	2,175	2,145	2,116	2,089
7	3,021	2,953	2,889	2,829	2,773	2,720	2,670	2,623	2,578	2,535	2,495	2,456	2,419	2,383	2,349	2,317	2,286	2,256
8	3,230	3,157	3,089	3,025	2,965	2,908	2,855	2,804	2,756	2,710	2,667	2,625	2,586	2,548	2,512	2,477	2,444	2,412
9	3,425	3,348	3,276	3,208	3,145	3,084	3,028	2,974	2,923	2,875	2,829	2,785	2,743	2,702	2,664	2,627	2,592	2,558
10	3,611	3,529	3,453	3,382	3,315	3,251	3,192	3,135	3,081	3,030	2,982	2,935	2,891	2,849	2,808	2,769	2,732	2,696
11	3,787	3,702	3,622	3,547	3,476	3,410	3,347	3,288	3,232	3,178	3,127	3,078	3,032	2,988	2,945	2,905	2,865	2,828
12	3,955	3,866	3,783	3,705	3,631	3,562	3,496	3,434	3,375	3,319	3,266	3,215	3,167	3,121	3,076	3,034	2,993	2,954
13	4,117	4,024	3,937	3,856	3,779	3,707	3,639	3,574	3,513	3,455	3,399	3,347	3,296	3,248	3,202	3,158	3,115	3,074
14	4,272	4,176	4,086	4,001	3,922	3,847	3,776	3,709	3,646	3,585	3,528	3,473	3,421	3,371	3,323	3,277	3,233	3,190
15	4,422	4,323	4,229	4,142	4,060	3,982	3,909	3,839	3,774	3,711	3,652	3,595	3,541	3,489	3,439	3,392	3,346	3,302
16	4,567	4,464	4,368	4,278	4,193	4,113	4,037	3,965	3,897	3,833	3,771	3,713	3,657	3,603	3,552	3,503	3,456	3,411
17	4,708	4,602	4,502	4,409	4,322	4,239	4,161	4,087	4,017	3,951	3,887	3,827	3,769	3,714	3,661	3,611	3,562	3,516
18	4,844	4,735	4,633	4,537	4,447	4,362	4,282	4,206	4,134	4,065	4,000	3,938	3,878	3,822	3,768	3,715	3,666	3,618
19	4,977	4,865	4,760	4,661	4,569	4,482	4,399	4,321	4,247	4,177	4,110	4,046	3,985	3,927	3,871	3,817	3,766	3,717
20	5,106	4,991	4,884	4,783	4,688	4,598	4,513	4,433	4,357	4,285	4,217	4,151	4,088	4,029	3,971	3,916	3,864	3,813
21	5,232	5,114	5,004	4,901	4,803	4,712	4,625	4,543	4,465	4,391	4,321	4,253	4,189	4,128	4,069	4,013	3,959	3,907
22	5,356	5,235	5,122	5,016	4,916	4,822	4,734	4,650	4,570	4,494	4,422	4,354	4,288	4,225	4,165	4,108	4,052	3,999
23	5,476	5,353	5,237	5,129	5,027	4,931	4,840	4,754	4,673	4,595	4,522	4,451	4,384	4,320	4,259	4,200	4,143	4,089
24	5,594	5,467	5,350	5,239	5,135	5,037	4,944	4,857	4,773	4,694	4,619	4,547	4,479	4,413	4,350	4,290	4,233	4,177
25	5,709	5,580	5,460	5,347	5,241	5,141	5,046	4,957	4,872	4,791	4,714	4,641	4,571	4,504	4,440	4,379	4,319	4,263
26	5,822	5,691	5,568	5,453	5,345	5,243	5,146	5,055	4,968	4,886	4,808	4,733	4,662	4,593	4,528	4,465	4,405	4,348
27	5,933	5,799	5,674	5,557	5,446	5,342	5,244	5,151	5,063	4,979	4,899	4,823	4,750	4,681	4,614	4,551	4,489	4,430
28	6,042	5,906	5,778	5,659	5,546	5,440	5,340	5,246	5,156	5,070	4,989	4,912	4,837	4,767	4,699	4,634	4,572	4,512
29	6,149	6,010	5,881	5,759	5,645	5,537	5,435	5,339	5,247	5,160	5,077	4,998	4,923	4,851	4,782	4,716	4,653	4,592
30	6,254	6,113	5,981	5,857	5,741	5,631	5,528	5,430	5,337	5,248	5,164	5,084	5,007	4,934	4,864	4,797	4,732	4,670
31	6,357	6,214	6,080	5,954	5,836	5,725	5,619	5,520	5,425	5,335	5,249	5,168	5,090	5,016	4,944	4,876	4,810	4,747
32	6,459	6,313	6,177	6,050	5,929	5,816	5,709	5,608	5,512	5,420	5,333	5,251	5,171	5,096	5,023	4,954	4,887	4,823
33	6,559	6,411	6,273	6,143	6,021	5,906	5,798	5,695	5,597	5,504	5,416	5,332	5,252	5,175	5,101	5,031	4,963	4,898
34	6,658	6,508	6,367	6,236	6,112	5,995	5,885	5,780	5,681	5,587	5,498	5,412	5,331	5,253	5,178	5,106	5,038	4,972
35	6,755	6,603	6,460	6,327	6,201	6,083	5,971	5,865	5,764	5,669	5,578	5,491	5,408	5,329	5,254	5,181	5,111	5,044
36	6,851	6,696	6,552	6,416	6,289	6,169	6,055	5,948	5,846	5,749	5,657	5,569	5,485	5,405	5,328	5,254	5,183	5,116
37	6,945	6,789	6,642	6,505	6,376	6,254	6,139	6,030	5,927	5,829	5,735	5,646	5,561	5,480	5,402	5,327	5,255	5,186
38	7,039	6,880	6,731	6,592	6,461	6,338	6,221	6,111	6,006	5,907	5,812	5,722	5,635	5,553	5,474	5,398	5,326	5,256
39	7,181	6,970	6,820	6,678	6,546	6,421	6,308	6,191	6,085	5,984	5,888	5,797	5,709	5,626	5,546	5,469	5,395	5,325
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	6,629	6,503	6,383	6,270	6,162	6,060	5,963	5,870	5,782	5,697	5,616	5,539	5,464	5,393

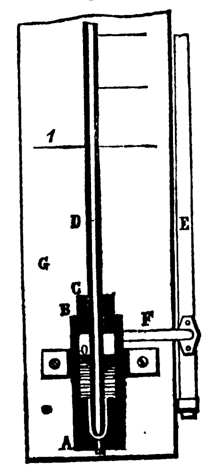
L'expérience a fait voir qu'une seule soupape, dont l'orifice avait un diamètre déterminé par la formule empirique (a) ou par celle (a'), suffisait pour débiter toute la vapeur qui pourrait se former dans la chaudière, à la pression absolue de N atmosphères ou à la pression effective de p kilog. par centimètre carré, sous l'influence du feu le plus actif. Ainsi, quand une chaudière sera munie de deux soupapes fonctionnant bien et ayant des dimensions calculées avec la formule (a) ou (a'), on n'aura point à craindre que la tension de la vapeur dépasse la limite assignée, sauf peut-être le cas où l'eau, par suite d'un défaut d'alimentation, parviendrait à atteindre des parois rouges.

775. Robinets et clapets. Les robinets de vapeur se font généralement en bronze. L'orifice d'écoulement est allongé afin de réduire le diamètre de la clef. On emploie les robinets à *boisseau* pour les conduites de vapeur de plus de $0^m,04$ de diamètre; au-dessous de ce chiffre, on fait usage des robinets-valves à soupape et à obturateur plan.

Les clapets de vapeur sont rectangulaires et se font en fonte ou bronze; cette dernière matière est usitée surtout pour les plus petits, qu'on munit souvent de cuir formant garniture (769).

776. Manomètre à mercure. Toute chaudière à vapeur doit être munie d'un manomètre, gradué de manière à faire connaître immédiatement la tension de la vapeur dans la chaudière (p. 976). Le tuyau qui amène la vapeur au manomètre doit être adapté directement sur la chaudière, et non sur le tuyau de prise de vapeur ou sur tout autre tuyau dans lequel la vapeur est en mouvement.

Fig. 168.



La figure 168 est la coupe, à l'échelle de 1/5, d'un manomètre à air libre, à cuvette et à tube en verre.

A cuvette en fer forgé; elle est formée d'un prisme en fer à base carrée de $0^m,06$ de côté, ayant $0^m,17$ de hauteur. On a foré, suivant l'axe du prisme, une cavité cylindrique de $0^m,04$ de diamètre et de $0^m,106$ de profondeur; au fond de cette cavité s'en trouve une autre d'un diamètre moindre, dans laquelle pénètre l'extrémité du tube manométrique.

B plaque en fer carrée fermant la cuvette, sur le haut de laquelle elle est fixée par quatre vis; le joint est fait à l'aide d'un peu de mastic de minium interposé entre les surfaces de contact.

C bouchon en fer vissé dans la plaque B. Ce bouchon est percé d'un trou dont le diamètre est un peu supérieur à celui du tube en verre qu'il doit recevoir. Vers le bas ce trou est rétréci pour retenir le mastic qui doit sceller le tube dans le bouchon C.

D tube en cristal, de $0^m,003$ de diamètre intérieur et de $0^m,009$ à $0^m,01$ de diamètre extérieur, dont la longueur dépend du maximum de pression que le manomètre doit mesurer.

E tube en fer creux de $0^m,015$ de diamètre intérieur, fermé supérieurement et inférieurement par des bouchons à vis en fer.

F petit tuyau courbé établissant la communication entre le bras du tube E et la cuvette A, immédiatement au-dessous du bouchon C. Un tuyau analogue, mais suffisamment long, établit de même la communication entre le haut du tube E et la chaudière.

G madrier en sapin portant l'échelle, et auquel est fixé tout l'appareil.

Cet appareil doit être rempli de mercure et monté sur place. Le madrier étant fixé à un mur vertical, avant de mettre le tube D en place, on verse le mercure dans la cuvette, jusqu'à ce qu'il ait atteint un niveau O, tel que quand la pression sera maximum, la surface du mercure couvre encore de 1/2 centimètre au moins le haut de la partie rétrécie de la cavité de la cuvette. On met alors en place le tube D, en tenant son extrémité à 4 ou 5 millimètres du fond de la cavité de la cuvette, et on le fixe au madrier G par des brides légères, en ayant soin d'interposer un peu de coton entre le tube et le madrier. On lute ensuite le tube au bouchon C, en ayant soin, pendant cette opération, d'échauffer ce dernier en le tenant entre des tenailles de forge portées au rouge sombre.

L'opération terminée et l'appareil refroidi, on remplit complètement le tube E d'eau, qui s'introduit également dans toute la partie restée vide de la cuvette, et on visse le bouchon qui ferme le haut du tube E.

La pression de la colonne d'eau a fait monter le mercure dans le tube en cristal jusqu'à un certain niveau, qui est le point de départ de l'échelle, et où l'on marque une atmosphère, d'après l'ordonnance de 1843. A partir de ce point, on divise le madrier, sur sa hauteur, en parties égales, dont chacune représente 1/10 d'atmosphère.

Désignant par h l'intervalle de deux divisions, en négligeant la variation du niveau O dans la cuvette, on aurait :

$$h = 0^{m},076.$$

Mais pendant que le niveau du mercure s'élève de h dans le tube D, il s'abaisse de $h\,\frac{\frac{1}{4}\pi d^2}{\frac{1}{4}\pi(\delta^2 - d'^2)}$ dans la cuvette; on a donc, en négligeant l'influence de l'eau qui remplace le mercure dans la cuvette :

$$0^{m},076 = h + h\,\frac{d^2}{\delta^2 - d'^2}, \quad \text{d'où} \quad h = 0^{m},076\,\frac{\delta^2 - d'^2}{\delta^2 - d'^2 + d^2}.$$

d diamètre intérieur du tube en cristal D;
d' diamètre extérieur *id.*
δ diamètre de la cavité de la cuvette A.

Comme, par suite de la condensation de la vapeur, le tube E reste constamment plein, et que l'eau qui remplace le mercure dans la cuvette tend à augmenter h, on a donc en réalité :

$$0^{m},076 = h + h\,\frac{d^2}{\delta^2 - d'^2} - h\,\frac{d^2}{\delta^2 - d'^2} \times \frac{1}{13,596},$$

ou sensiblement :

$$0^{m},076 = h\,\frac{27(\delta^2 - d'^2) + 25d^2}{27(\delta^2 - d'^2)}, \quad \text{d'où} \quad h = 0^{m},076\,\frac{27(\delta^2 - d'^2)}{27(\delta^2 - d'^2) + 25d^2}. \qquad (a)$$

13,596 densité du mercure; dans la formule on a fait $13,596 \times 2 = 27$.

Pour $\delta = 0^m,04$, $d' = 0^m,01$ et $d = 0^m,003$, on a :

$$h = 0^m,076 \frac{27\,(0,04^2 - 0,01^2)}{27\,(0,04^2 - 0,01^2) + 25 \times 0,003^2} = 0^m,0756.$$

Si le manomètre est composé de deux branches dans lesquelles il y a du mercure, sans cuvette, l'échelle se gradue encore à l'aide de la formule (a), dans laquelle δ représente le diamètre intérieur de la branche qui communique avec la chaudière, et où $d' = 0$, puisque le tube en verre ne plonge plus dans la cavité du diamètre δ.

Comme il est très difficile d'obtenir des tubes très réguliers sur une longueur aussi grande que l'exige un manomètre à air libre indiquant 5 à 6 atmosphères de pression, il convient, surtout pour les manomètres sans cuvettes, de les graduer au moyen d'une pompe portant un manomètre-étalon.

Lorsque le tube indicateur est en verre, on voit le niveau du mercure dans toutes ses positions; mais quand il est en fer, on est obligé d'indiquer la pression au moyen d'un flotteur équilibré par un contre-poids, à l'aide d'un fil très flexible passant sur une petite poulie très mobile.

Si le manomètre est gradué d'après les décrets de 1865 et de 1880 (p. 976 et 984), on marque 0 kilog. au point marqué 1 atmosphère dans la graduation précédente, et l'on divise le madrier, sur sa hauteur, en parties égales dont chacune représente $0^k,1$.

L'intervalle h de deux divisions se calcule par la formule précédente, en remplaçant $0^m,076$ par $\frac{0,076}{1,033\,29} = 0^m,073\,55$.

Pour graduer l'échelle d'un manomètre à air comprimé (*fig.* 169), on se sert de la formule :

Fig. 169.

$$P = 2h + 0,76 \frac{H}{H - h}, \qquad (Int.\ 1730)$$

d'où (*Int.* 538)

$$h = \frac{P}{4} + \frac{H}{2} - \sqrt{\left(\frac{P}{4} + \frac{H}{2}\right)^2 - H\,\frac{P - 0,76}{2}}.$$

P pression absolue de la vapeur, en hauteur de mercure;
$H = AD$ longueur du tube occupée par l'air sous la pression atmosphérique $0^m,76$;
$h = DD'$ quantité dont H se comprime quand la pression passe de $0^m,76$ à P; c'est la moitié de la différence du niveau du mercure dans les deux branches, qu'on suppose de même diamètre.

Donnant à P différentes valeurs, on en conclura les valeurs correspondantes de h. Pour le timbre $N = 5$ *atm.* ou $P = 3^m,80$ de mercure, supposant $H = 0^m,60$, on conclut de la dernière formule $h = 0^m,443$.

Comme vérification, en substituant cette valeur de h dans la première formule, on en conclurait bien $P = 3^m,80$.

La pression effective en hauteur de mercure étant $P - 0,76$, en hauteur d'eau, elle est $(P - 0,76)\ 13,596$, et en kilogrammes par centimètre

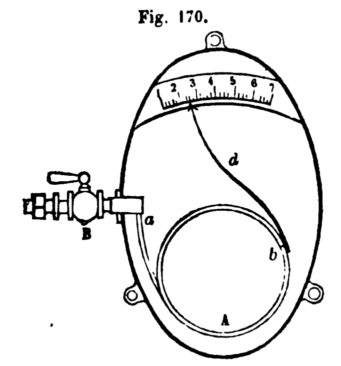
carré (771),

$$p = (P - 0,76)\,1,3596, \quad \text{d'où} \quad P = \frac{p}{1,3596} + 0,76.$$

Remplaçant P par cette valeur dans les formules précédentes, elles donneront h ou le numéro p du timbre d'après les décrets de 1865 et de 1880.

777. Manomètre métallique Eugène Bourdon. Ce manomètre, entièrement métallique et sans mercure, est basé sur ce principe : lorsqu'un tube métallique est enroulé en hélice, toute augmentation de pression intérieure ou diminution de pression extérieure le déroule, et au contraire toute diminution de pression intérieure ou augmentation de pression extérieure l'enroule d'avantage.

Fig. 170.



La figure 170 représente le manomètre de Bourdon. Le tube A est en laiton bien homogène; sa longueur est de $0^m,70$, et sa section est une ellipse ayant 11 et 4 millimètres pour axes; il est enroulé dans le sens de son petit axe sur un peu moins de deux spires. Son extrémité a est fixée à une tubulure à robinet B, qui permet de le mettre en communication avec la chaudière ou le récipient dont le manomètre doit indiquer la pression intérieure. L'extrémité b est fermée et tout à fait libre; elle porte une aiguille d qui se meut sur un cadran qu'on a gradué en atmosphères et fractions d'atmosphère à l'aide d'un manomètre-étalon à air libre, en faisant fonctionner l'appareil avec de l'air comprimé. Le tout est renfermé dans une caisse en fonte qui préserve l'appareil des chocs et permet de le fixer où l'on veut. A partir du robinet B, le tube qui va à la chaudière doit se courber de manière à s'élever jusqu'à un niveau supérieur au manomètre; par cette précaution, il reste toujours un peu d'eau provenant de la vapeur condensée dans la partie basse du tuyau, et la vapeur ne venant jamais jusque dans le tube élastique, celui-ci est dans les meilleures conditions de conservation.

La pression effective 0 correspond à la division de 1 *atm.* de la graduation précédente, et les divisions du cadran expriment les pressions effectives en kilogrammes et fractions de kilogramme par centimètre carré.

Ce manomètre est très portatif, peu volumineux, nullement fragile, et il ne coûte que 50 francs. Concurremment avec le manomètre Desbordes, on en fait un usage exclusif sur les locomotives.

L'administration a commandé des *manomètres vérificateurs*, gradués jusqu'à 18 atmosphères; elle en a adressé aux ingénieurs chargés de la surveillance des appareils à vapeur et de la vérification des instruments manométriques employés sur les chaudières. Une tubulure réglementaire à robinet, dont la bride a $0^m,04$ de diamètre extérieur,

sert à fixer le manomètre vérificateur. Ces manomètres-étalons sont employés avec avantage pour les épreuves des chaudières à vapeur (773). Ils remédient à l'incertitude presque inévitable des résultats fournis par les soupapes, qui laissent souvent, par suite d'un défaut de rodage, échapper l'eau bien avant que la pression ait atteint son degré maximum. Quand une rupture a lieu, ils indiquent à quelle pression elle s'est produite. En donnant constamment la pression, ils évitent qu'on la pousse au delà de la limite légale, ce qui est toujours dangereux pour les appareils; les soupapes, en grippant sur leur siège, peuvent ne se soulever que sous un excès de charge.

L'appareil ayant bien résisté, si un joint vient à manquer à une pression voisine de la pression légale, on peut considérer l'épreuve comme satisfaisante, au lieu qu'avec l'usage seul de la soupape on est obligé de tout recommencer.

Eugène Bourdon a construit des manomètres de son système indiquant des pressions s'élevant à 200 ou 300 atmosphères, et qui trouvent leur emploi dans la solidification des gaz (507).

Dans le manomètre Desbordes, la vapeur agit sur une rondelle en caoutchouc fixée sur tout son contour aux parois du tube qui communique avec la chaudière, de manière à fermer ce tube, qui est renflé en ce point. La pression augmentant, la rondelle de caoutchouc se soulève en son milieu et pousse un petit piston dont la tige vient faire fléchir une lame d'acier qui communique le mouvement à l'aiguille, par l'intermédiaire d'un mécanisme qui augmente les amplitudes des mouvements.

E. Bourdon a construit aussi des *baromètres* métalliques fondés sur le même principe que son manomètre. Seulement le tube est fixé au support par son milieu, et il est fermé complètement à ses extrémités. De plus, on y a fait un vide aussi parfait que possible, à un millimètre de mercure; d'où il résulte que, selon que la pression atmosphérique augmente ou diminue, le tube se ferme ou s'ouvre, et l'on profite du mouvement de ses extrémités pour faire tourner une aiguille sur un cadran barométrique. La section du tube, au lieu d'être elliptique, est formée de deux arcs de cercle.

Le *baromètre anéroïde* Vidy est le premier baromètre entièrement métallique qui ait été construit. Il est formé d'une espèce de lentille creuse en laiton, dans laquelle on a fait le vide; les parois minces se rapprochent ou s'écartent par suite des variations de la pression de l'air extérieur, et l'on profite de leur oscillation pour communiquer le mouvement à une aiguille. Le tout est renfermé dans une boîte circulaire, dont une face est formée par une glace qui permet de lire sur le cadran que parcourt l'aiguille.

778. Alimentation des chaudières (766). Toute chaudière à vapeur doit être munie d'une pompe d'alimentation bien construite et en bon état d'entretien, ou de tout autre appareil alimentaire d'un effet certain. (Voir *Machines à vapeur*, 2ᵉ volume.)

779. Indicateur du niveau de l'eau. Le niveau que l'eau doit avoir

habituellement dans chaque chaudière est indiqué à l'extérieur par une ligne tracée d'une manière apparente sur le corps de la chaudière ou sur le parement du fourneau. Cette ligne, que nous appellerons *ligne de niveau d'eau*, est d'un décimètre au moins au-dessus de la partie la plus élevée des carneaux, tubes ou conduits de la flamme et de la fumée dans le fourneau (p. 976).

Fig. 171.

Chaque chaudière est pourvue d'un *sifflet d'alarme* (*fig.* 171), qui se fixe à la chaudière à l'aide d'une bride que porte le manchon FF. La tige E descend dans la chaudière et porte un flotteur. Quand le niveau de l'eau baisse de 0^{m},05 au-dessous de la ligne de niveau d'eau, la tige E descend et permet à la vapeur de passer par le canal A; la vapeur du canal A se rend, par les trous BB, dans le canal annulaire II, d'où elle sort par la fente circulaire très étroite CC, pour frapper les bords du timbre ou cloche renversée DD et produire un sifflement très aigu. Le flotteur, qui est ordinairement une pierre de liais du poids de 23 kilog. environ, et la tige E sont équilibrés par un contre-poids; celui-ci, ainsi que son levier, qui repose sur des couteaux, sont placés dans la chaudière.

La figure 172 représente, à l'échelle de 1/6, la disposition adoptée par Eugène Bourdon pour le sifflet d'alarme, l'indicateur de niveau et la soupape de sûreté.

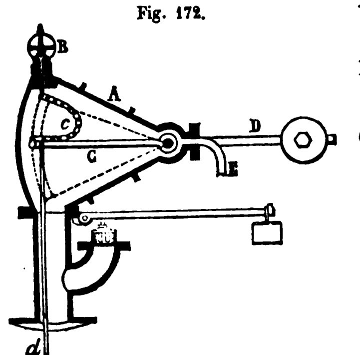


Fig. 172.

A boîte en fonte, à nervures pour résister à la pression de la vapeur, fixée sur la chaudière par une bride à cinq boulons.

B sifflet d'alarme; la soupape qui le ferme est ramenée sur l'ouverture par un ressort à boudin.

C levier du flotteur; quand le niveau baisse, ce levier, par l'intermédiaire de la chaîne en cuivre *c*, système de Galle (367), très flexible, fait baisser la soupape qui ferme le sifflet.

D levier du contre-poids du flotteur; il est monté sur l'axe du levier C, en dehors de la caisse, et il se prolonge latéralement à la caisse par une aiguille qui indique par sa position le niveau de l'eau dans la chaudière. Avec cette disposition, le flotteur, au lieu de vaincre directement le frottement de la tige *d* du flotteur dans le stuffing-box, comme cela a lieu ordinairement, le vainc par l'intermédiaire d'un levier, ce qui le rend plus sensible. Bourdon, en faisant l'axe du levier C à embase conique qui s'applique contre l'intérieur de la caisse du côté qui porte le levier D, et en le poussant par son autre extrémité à l'aide d'une pointe conique qui se visse dans une plaque appliquée latéralement à la caisse, évite la boîte à étoupe; une simple rondelle de cuir, de feutre ou d'étoupe, forme le joint de cette plaque. La chaîne *c* doit être verticale quand elle ouvre la soupape du sifflet.

Dans ses derniers appareils, Bourdon a supprimé la chaîne *c*. La soupape qui interrompt l'arrivée de la vapeur au sifflet est horizontale, et se prolonge à l'extérieur par une tige tirée en dehors par un ressort à boudin; un levier extérieur, monté sur le même axe que ceux C et D, vient presser sur cette tige

quand le niveau atteint sa limite inférieure. De plus, l'embase conique de l'arbre des leviers, au lieu d'être poussée sur son siège par une vis, y est tirée par un étrier à vis placé à l'extérieur du côté des leviers.

E tube établissant la communication entre la chaudière et le manomètre, ou servant à une prise quelconque de vapeur.

Outre le flotteur d'alarme, la chaudière est munie de l'un des trois appareils suivants : 1° un flotteur ordinaire d'une mobilité suffisante; 2° un tube indicateur en verre; 3° des robinets indicateurs convenablement placés à des niveaux différents. Ces appareils indicateurs doivent, dans tous les cas, être placés en vue du chauffeur (744).

M. Lethuiller a supprimé le stuffing-box des flotteurs, en faisant monter leur tige dans une boîte verticale en cuivre fermée supérieurement par le sifflet d'alarme. Le dessus de la tige porte un aimant en fer à cheval qui entraîne dans ses mouvements une aiguille aimantée placée en regard, hors de la boîte, dans un petit compartiment où la vapeur n'arrive pas. Une glace, qui ferme ce compartiment, permet de voir la position de l'aiguille sur une échelle.

Si plusieurs chaudières sont destinées à fonctionner ensemble, elles doivent être disposées de manière à pouvoir, au besoin, être rendues indépendantes les unes des autres. En conséquence, chaque chaudière doit être alimentée séparément, et être munie de tous les appareils de sûreté. Un seul manomètre suffit pour plusieurs chaudières ayant un réservoir de vapeur commun (p. 976).

780. Tuyaux de vapeur. On calcule l'épaisseur des tuyaux de vapeur, en fonte, à l'aide de la formule :

$$e = \frac{12 + D}{50}.$$

Pour les tuyaux en cuivre ou en laiton, on se sert de la formule :

$$e = \frac{1 + D}{24}.$$

Tubages Bérendorf. Ces tubes ont l'avantage de pouvoir se démonter facilement pour le nettoyage. Ils portent à chaque bout une virole soudée extérieurement et tournée en cône très aigu; les deux cônes sont de même sens et assez différents pour que le tube puisse s'introduire à travers l'une des plaques. Le tube, introduit à force, fait joint des deux bouts en même temps, par son seul serrage. Les bagues brutes ont de 5 à 6 millimètres d'épaisseur; en dehors du tube, leur longueur est de 6 à 7 centimètres, la différence entre les diamètres de la bague et du tube varie des 3/10 aux 6/10 de la longueur de la bague.

781. Poids moyens des tuyaux en cuivre rouge soudés, par mètre.

DIAMÈTRE extérieur en millimètres	ÉPAISSEUR								
	1 millim.	1mm,25	1mm,5	1mm,75	2 millim.	2mm,5	3 millim.	4 millim.	5 millim.
millim.	kilogr.	kilogr.	kilogr.	kilogr.	kilogr.	kilogr.	kilogr.	kilogr.	kilogr.
10	0,305	0,393	0,484	0,570	0,663	0,870	1,078	1,550	2,075
15	0,442	0,566	0,690	0,815	0,940	1,216	1,492	2,100	2,465
20	0,580	0,740	0,900	1,057	1,216	1,562	1,907	2,655	3,455
25	0,720	0,912	1,105	1,300	1,492	1,910	2,322	3,207	4,146
30	0,858	1,085	1,313	1,540	1,770	2,255	2,737	3,760	4,837
35	0,995	1,260	1,520	1,783	2,045	2,600	3,150	4,313	5,530
40	1,135	1,430	1,730	2,025	2,322	2,994	3,566	4,866	6,220
45	1,270	1,605	1,935	2,267	2,600	3,290	3,980	5,420	6,910
50	1,410	1,776	2,143	2,510	2,875	3,635	4,396	5,972	7,600
55	»	1,950	2,350	2,750	3,150	3,980	4,810	6,525	8,292
60	»	2,122	2,558	2,993	3,430	4,325	5,225	7,080	8,993
65	»	2,295	2,765	3,253	3,705	4,670	5,640	7,630	9,674
70	»	2,470	2,972	3,477	3,980	5,015	6,055	8,185	10,365
75	»	»	3,180	3,720	4,257	5,360	6,470	8,732	11,060
80	»	»	3,387	3,960	4,534	5,707	6,885	9,290	11,750
85	»	»	3,595	4,203	4,810	6,053	7,300	9,842	12,440
90	»	»	3,802	4,445	5,087	6,400	7,715	10,395	13,130
95	»	»	4,010	4,887	5,363	6,745	8,130	10,950	13,822
100	»	»	4,218	5,230	5,640	7,090	8,543	11,500	14,513
105	»	»	»	»	5,916	7,437	8,960	12,056	15,204
110	»	»	»	»	6,193	7,783	9,375	12,607	15,896
115	»	»	»	»	6,470	8,130	9,788	13,160	16,587
120	»	»	»	»	6,746	8,480	10,200	13,713	17,280

782. Poids des tuyaux en laiton, sans soudures.

DIAMÈTRE extérieur	ÉPAISSEUR								
	1 millim.	1mm,25	1mm,5	1mm,75	2 millim.	2mm,25	2mm,5	2mm,75	3 millim.
millim.	kilogr.	kilogr.	kilogr.	kilogr.	kilogr.	kilogr.	kilogr.	kilogr.	kilogr.
10	0,240	0,292	0,340	0,385	0,427	»	»	»	»
15	0,373	0,458	0,540	0,620	0,694	0,765	0,834	0,900	0,960
20	0,507	0,625	0,740	0,850	0,960	1,066	1,168	1,125	1,360
25	0,640	0,790	0,940	1,085	1,230	1,366	1,502	1,633	1,760
30	0,774	0,960	1,140	1,320	1,495	1,667	1,835	2,000	2,160
35	0,907	1,126	1,340	1,533	1,760	1,967	2,169	2,368	2,562
40	1,041	1,290	1,540	1,790	2,030	2,268	2,503	2,735	2,964
45	1,174	1,460	1,740	2,020	2,296	2,568	2,840	3,102	3,364
50	1,308	1,625	1,940	2,254	2,563	2,868	3,170	3,470	3,765
55	1,440	1,795	2,142	2,490	2,830	3,170	3,505	3,835	4,165
60	1,575	1,960	2,343	2,720	3,098	3,470	3,838	4,205	4,565
65	1,710	2,125	2,543	2,955	3,365	3,770	4,170	4,570	4,965
70	1,840	2,295	2,743	3,189	3,630	4,070	4,505	4,938	5,365
75	1,975	2,460	2,944	3,423	3,898	4,370	4,840	5,305	5,765
80	2,110	2,630	3,144	3,656	4,165	4,670	5,170	5,672	6,168
85	2,243	2,795	3,344	3,890	4,430	4,970	5,505	6,040	6,570
90	2,376	2,962	3,544	4,125	4,700	5,272	5,840	6,405	6,970
100	»	»	»	4,590	5,235	5,870	6,510	7,140	7,770

782bis. Poids du mètre courant des tubes cuivre rouge, sans soudures.

DIAMÈTRE intérieur en millimètres	ÉPAISSEUR								
	1 millim.	1mm,25	1mm,5	1mm,75	2 millim.	2mm,5	3 millim.	4 millim.	5 millim.
millim.	kilogr.	kilogr.	kilogr.	kilogr.	kilogr.	kilogr.	kilogr.	kilogr.	kilogr.
10	0,305	0,390	0,480	0,570	0,667	0,868	1,085	1,556	2,085
12	0,360	0,460	0,563	0,670	0,778	1,007	1,250	1,780	2,363
15	0,445	0,564	0,688	0,814	0,945	1,216	1,500	2,313	2,780
18	0,528	0,670	0,813	0,960	1,112	1,424	1,750	2,446	3,197
20	0,583	0,738	0,896	1,058	1,223	1,563	1,918	2,670	3,475
25	0,722	0,912	1,105	1,300	1,500	1,910	2,335	3,225	4,170
30	0,860	1,086	1,313	1,544	1,780	2,260	2,752	3,780	4,865
35	1,000	1,260	1,522	1,788	2,057	2,606	3,170	4,337	5,560
40	1,140	1,433	1,730	2,030	2,335	2,958	3,586	4,893	6,255
45	1,278	1,607	1,940	2,274	2,613	3,300	4,003	5,450	6,950
50	1,417	1,780	2,147	2,517	2,890	3,650	4,420	6,005	7,645
55	1,556	1,954	2,356	2,760	3,169	3,996	4,837	6,560	8,340
60	1,695	2,128	2,564	3,004	3,447	4,344	5,254	7,117	9,035
65	1,835	2,302	2,773	2,247	3,725	4,690	5,670	7,673	9,730
70	1,974	2,476	2,980	3,490	4,003	5,040	6,088	8,229	10,426
75	2,113	2,650	3,190	3,734	4,280	5,386	6,505	8,785	11,120
80	2,252	2,823	3,398	3,977	4,560	5,734	6,922	9,340	11,816
85	2,390	2,998	3,607	4,220	4,837	6,080	7,340	9,897	12,510
90	2,530	3,170	3,815	4,464	5,115	6,426	7,757	10,453	13,206
95	2,670	3,345	4,024	4,707	5,393	6,777	8,174	11,010	13,900
100	2,808	3,518	4,233	4,950	5,671	7,124	8,590	11,566	14,596
105	2,947	3,692	4,440	5,193	5,950	7,472	9,008	12,122	15,290
110	3,086	3,860	4,650	5,437	6,227	7,820	9,425	12,678	15,986
115	3,225	5,040	4,858	5,680	6,505	8,168	9,842	13,234	16,680

Les tubes en fer, soudés à recouvrement, s'emploient aussi pour chaudières, de même que les tubes en acier doux Bessemer.

783. Joints des chaudières. Les joints doivent être visités et presque tous refaits chaque fois qu'on visite et qu'on nettoie les chaudières. Faire les joints, c'est adapter entre les parties qui doivent être jointes des garnitures de filasse ou des rondelles de plomb imbibées ou entourées d'un mastic spécial, de façon à produire une fermeture hermétique et imperméable.

Les joints doivent être soigneusement lutés au mastic de minium. En les préparant, on place sur les bords de chaque bouchon une petite couronne de filasse ou de plomb qui empêche le mastic, régulièrement étalé au-dessus et autour, d'obstruer l'intérieur et de déborder extérieurement sous l'effet du serrage des écrous et boulons des raccords. Avant que le mastic soit sec, on serre les boulons et écrous, en ayant soin d'huiler les parties filetées et en prenant garde d'arracher les tiges des autoclaves.

Pour refaire les joints, on procède dans l'ordre et de la façon qui suit :

1° Robinet de la prise de vapeur au dôme de soupape et à la boîte, — au minium;

2° Tuyau d'échappement du cylindre au coude d'échappement dans la cheminée, — au minium;

3° Petits tuyaux de purge du cylindre et de la boîte à vapeur, — simple rondelle de plomb sans minium;

4° De la pompe aux robinets, — rondelles de plomb sans minium;

5° Du robinet au bac d'alimentation, — rondelles de plomb;

6° Aux deux robinets du niveau d'eau, — filasse et minium;

7° Sièges des soupapes de sûreté et du sifflet, — minium;

8° Du manomètre au petit robinet, — rondelle de plomb;

9° Petits autoclaves, — minium et étoupes en tresse;

10° Grand tampon autoclave, — minium et filasse en tresse.

L'emploi du mastic de minium étant très fréquent et ceux qu'on trouve tout préparés n'offrant pas des garanties suffisantes, il vaut mieux le faire soi-même, ce qui est simple et facile. Voici la recette: Prenez deux parties de minium et une partie de céruse broyée à l'avance à l'huile de lin; pétrissez-les ensemble à coups de marteau sur une pierre; parfois on incorpore dans ce mélange un peu de filasse hachée d'avance.

783bis. **Forme des jets de vapeur.** M. Henderson a exposé en 1887, devant la Société des Ingénieurs de Philadelphie, le résultat de ses recherches sur la forme des jets de vapeur. Il a opéré sur des jets lancés de bas en haut par des tubes de 12, 19 et 25 millimètres de diamètre, terminés par des ajutages coniques de 13 millimètres de longueur dont l'orifice avait un diamètre inférieur de 6 millimètres à celui des tubes. La pression de la vapeur était de 6kg,5 et de 10 kilog. par centimètre carré. M. Henderson a trouvé, au moyen de reproductions photographiques, que la forme du jet est un tronc de cône.

On a trouvé les valeurs suivantes pour le demi-angle du cône :

Diamètre de l'orifice des ajutages.	Valeur du demi-angle pour les pressions de	
	6kg,5	10kg.
6 millimètres.	11° 19'	12° 4'
13 —	11° 39'	10° 54'
19 —	13° 5'	11° 27'

783 *ter*. **Comparaison entre les divers systèmes de générateurs de vapeur (anciens et modernes).** Nous donnons quelques extraits d'un résumé très substantiel fait dans la *Revue technique de l'Exposition de* 1889, par M. F. Bougarel, ingénieur, secrétaire du Syndicat des chauffeurs et mécaniciens de la Seine.

« Les chaudières à vapeur qui ont figuré à l'Exposition de 1889, se divisent en deux principaux genres : les chaudières à production rapide, c'est-à-dire les *chaudières multitubulaires*, à faible volume d'eau, dites *inexplosibles*, dont l'emploi a pris, depuis quelques années, une grande extension, et les chaudières *à grand volume d'eau*, qui sont un peu

abandonnées, parce que sans doute, on croit qu'elles sont plus dangereuses que les précédentes.

« Au risque d'être considéré comme un vieux routinier, je déclare que j'ai la plus grande estime et une préférence justifiée pour la plus ancienne des chaudières à grand volume d'eau, la chaudière à deux bouilleurs inférieurs, qui n'a figuré à l'Exposition que sous la forme perfectionnée de chaudière semi-tubulaire. »

La chaudière à deux bouilleurs inférieurs, sans tubes intérieurs, a été créée, vers 1825, par M. A. Durenne père, en vue du remplacement des premières chaudières à vapeur employées dans l'industrie en France, lesquelles étaient en fonte.

« Sans retirer aux chaudières multitubulaires aucune des qualités qui leur sont justement attribuées, il est permis de douter qu'on voie jamais une chaudière de ce genre, ayant 50 ans de service, et dont les parties essentielles n'auront pas été remplacées plusieurs fois. Et, au point de vue des explosions, je ne crois pas que la statistique administrative puisse démentir mon affirmation que les chaudières multitubulaires ont donné lieu relativement à un plus grand nombre d'explosions que les chaudières ordinaires à deux bouilleurs; mais je me hâte d'ajouter que les effets des explosions de ces dernières sont plus terribles que ceux de l'explosion des chaudières multitubulaires, et particulièrement des chaudières du système Belleville, dans lesquelles le volume d'eau étant insignifiant, les effets de la vapeur d'un ou de plusieurs tubes sont presque nuls. »

M. Bougarel déclare que le véritable créateur du générateur dit *inexplosible* est M. Belleville, que tous les constructeurs de générateurs multitubulaires français et étrangers n'ont fait que suivre dans la voie qu'il a ouverte. M. Belleville a essayé dès 1849 de produire la vaporisation instantanée avec un générateur composé de tubes d'un très petit diamètre, et après quelques années, il est arrivé à construire le générateur si connu et si répandu qu'il a constamment perfectionné.

« Vers la même époque, un autre inventeur français, M. Hédiard, créait aussi avec le concours de la maison Jolly, d'Argenteuil, un générateur dit *inexplosible.* Il est encore employé aujourd'hui, quoiqu'il n'ait figuré à aucune Exposition universelle depuis 1867, où M. Hédiard obtint une médaille de bronze pour l'un des générateurs de son système qui fonctionnait dans cette Exposition, et qui après plus de 20 ans de service fonctionnait encore chez M. Piver, le parfumeur bien connu. »

Dans un autre passage de sa conclusion sur les générateurs, M. Bougarel s'exprime ainsi : « Ma grande estime pour les chaudières à deux bouilleurs ordinaires ne m'empêche pas d'apprécier, comme elles méritent de l'être, les chaudières demi-tubulaires, les chaudières tubulaires à foyer et faisceau de tubes amovibles du système Thomas et Laurens. Les chaudières des systèmes Galloway, Fouché et de Laharpe, Farcot, Imbert, Dulac, etc., tout en devant être classées dans les chaudières à grand volume d'eau, peuvent être considérées comme des chaudières à

production rapide, présentant la qualité de grande stabilité présentée par la vieille chaudière à bouilleur ordinaire. J'avoue cependant que toutes les fois que je trouve dans une usine la place nécessaire pour l'installation de la vieille chaudière à bouilleur, c'est encore celle-ci que je conseille d'installer de préférence à toute autre. »

THERMODYNAMIQUE

784. Équivalent mécanique de la chaleur. Quand deux corps se frottent l'un contre l'autre, il y a du travail produit ou dépensé et de la chaleur dégagée.

Si l'on comprime un gaz, il y a également du travail dépensé et de la chaleur dégagée. Si, au contraire, le gaz se dilate en exerçant une pression contre son enveloppe, il y a production de travail et absorption de chaleur. Comme cas particulier, si le gaz se dilate sans produire de travail, il ne perd pas de chaleur; ainsi, en établissant une communication entre un récipient rempli de gaz comprimé et un autre récipient où l'on a fait le vide, le gaz possède, quand il occupe les deux récipients, la même température que quand il n'occupait qu'un récipient.

La vapeur, en poussant le piston d'une machine à vapeur, produit du travail en même temps qu'elle perd une portion de la chaleur qu'elle possédait en arrivant au cylindre. Une calorie transformée en travail mécanique produit 425 kilogrammètres.

Dans tous les cas, il *existe un rapport constant entre le travail dépensé ou le travail produit et la chaleur dégagée ou la chaleur absorbée*, et ce rapport est égal à 425; le rapport de la chaleur au travail est, par suite, égal à $\frac{1}{425}$.

425, le nombre de kilogrammètres produit par une unité de chaleur ou qui est produit par l'absorption de cette unité, s'appelle *équivalent mécanique de la chaleur*. $\frac{1}{425}$ de calorie, correspondant au travail de 1^{km}, est appelé *équivalent calorifique du travail.*

Ce rapport a été trouvé expérimentalement par Joule, qui employait la chute de poids à faire tourner un agitateur dans un calorimètre, ou encore à faire frotter deux solides l'un contre l'autre. Puluj en 1876, et Rowland en 1879, puis Violle, ont repris, en la modifiant un peu, la méthode de Joule, et ont trouvé à très peu près les mêmes nombres.

M. Hirn, en expérimentant sur une machine à vapeur, où les pertes sont très grandes, a trouvé 398 comme équivalent mécanique de la chaleur développée. La thermodynamique étudie les relations mesurables qui se manifestent entre la chaleur et le travail, soit que le travail se produise aux dépens de la chaleur, soit que la chaleur apparaisse comme l'effet d'une dépense de travail (machines thermiques).

Bien avant Joule, Carnot avait formulé le principe suivant : *Il ne peut y avoir transformation de chaleur en travail que s'il y a chute de température.* Une machine ne peut produire de travail si sa température est uniforme dans toutes ses parties. Clausius a formulé le principe suivant : *On ne peut faire passer de la chaleur d'un corps à un autre dont la température n'est pas moindre, sans dépenser du travail.*

1 kilog. d'eau à 0°, pour se transformer en glace sans changer de température, dégage 79 calories (489); d'autre part, comme 1 calorie équivaut à 425 kilogrammètres, il en résulte que la transformation d'un kilog. d'eau à 0° en glace développe $425 \times 79 = 33\,575$ kilogrammètres.

NOTE COMPLÉMENTAIRE DE L'ÉCLAIRAGE.

(Voir pages 827 à 881.)

Le gaz à l'eau. A Francfort-sur-Mein, l'usine à gaz fabrique du gaz à l'eau pour les usages industriels. Ce gaz a la composition suivante :

Hydrogène	51 p. 100
Oxyde de carbone	36 »
Azote	7 »
Acide carbonique	4 »
Eau	2 »

Des essais comparatifs ont été faits dans une fabrique de porcelaine avec le gaz de houille ordinaire et le gaz à l'eau. On opérait sur une même quantité de matières fusibles et dans des conditions identiques avec les deux gaz dans un four Pernot (561), et l'on consomma :

4,6 et 6,5 de gaz à l'eau

contre 19,6 et 28,6 de gaz de houille ordinaire.

Dans d'autres expériences on opéra sur les mêmes quantités d'argent fin et de cuivre pur que l'on fit fondre dans le même four, d'abord au moyen du gaz à l'eau et ensuite au moyen du gaz de houille ordinaire. On consomma :

4,3 et 5,7 de gaz à l'eau

contre 16,7 et 21,7 de gaz de houille ordinaire.

Le gaz à l'eau est fourni par l'usine de Francfort au prix de 6 pfennig (0f,075).

Mais le gaz à l'eau, qui avait été recommandé comme gaz d'éclairage, en raison de son bon marché, présente de réels dangers, qui ont motivé une discussion au Congrès d'hygiène de Vienne (Autriche) tenu en 1887.

Ce gaz ne possède aucune odeur et constitue par là un grave péril, tandis qu'on est toujours averti de la présence du gaz ordinaire.

A New-York, bien qu'on se soit peu servi du gaz à l'eau, de 1880 à 1888, y compris le mois de février 1888, il n'en a pas moins tué par empoisonnement 184 personnes, tandis que le gaz de houille, pendant le même temps, n'a produit que 9 victimes.

Ce gaz à l'eau est au moins 20 fois plus dangereux que le gaz de houille. On a recommandé de joindre au gaz à l'eau une matière odorante, avant sa distribution dans les réseaux de consommation.

FIN DU PREMIER VOLUME.